INVESTIGACIÓN Y CIENCIA | EL REINO DE LOS PTEROSAURIOS | MATEMÁTICAS DE LEONARDO DA VINCI | RAÍCES DE LA AGRESIVIDAD HUMANA | DICIEMBRE 2019 N.º 519

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

Diciembre 2019 • N.º 519 • 6,90 €

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

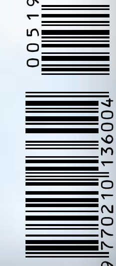
¿Cómo lograron dominar los cielos del Mesozoico?

EL REINO DE LOS PTEROSAURIOS

HISTORIA
Las matemáticas de Leonardo da Vinci

NEUROCIENCIA
Mapa cerebral de la agresividad humana

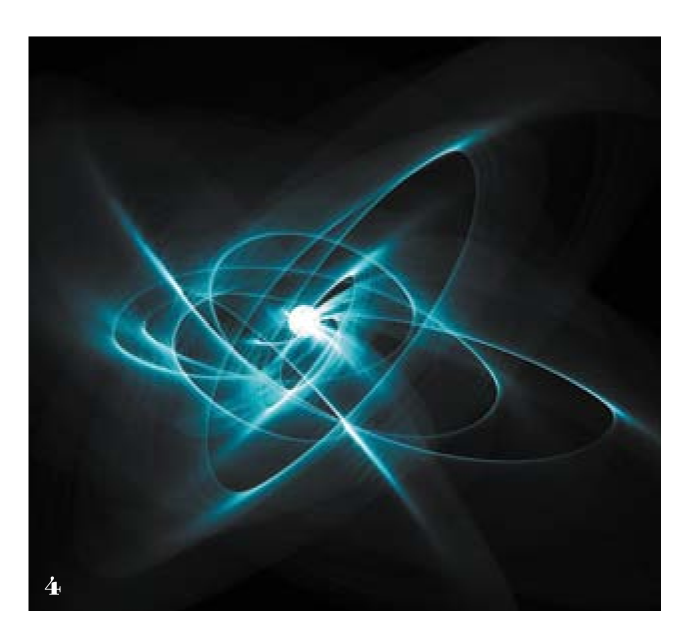
FÍSICA
Hacia la soñada superconductividad a temperatura ambiente





VINCE BURTON/ALAMY

ARTÍCULOS


4


53

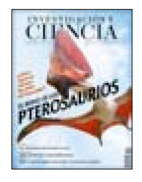

84

INVESTIGACIÓN Y
CIENCIA

SECCIONES

EN PORTADA

Durante el período Cretácico, el pterosaurio *Tupandactylus imperator* dominaba los cielos. Al igual que otros pterosaurios de esta época, presentaba unos rasgos anatómicos desproporcionados, como una cabeza y un cuello gigantescos en comparación con el resto del cuerpo. Los investigadores están empezando a entender ahora cómo estas enormes criaturas podían alzar el vuelo y desplazarse por el aire. Ilustración de Chase Stone.



redaccion@investigacionyciencia.es



Julio 2019

CUERPO ELECTRIZANTE

He disfrutado leyendo «La temible y electrizante anguila», de Kenneth C. Catania [Investigación y Ciencia, julio de 2019]. Me gustaría saber qué experimentos se han llevado a cabo para averiguar cómo se protege la anguila de sus propias descargas eléctricas. ¿Se halla su sistema nervioso aislado o protegido de alguna manera?

Bruce Rogers

Responde Catania: *Se trata de una excelente pregunta. Mucha gente —yo incluido— siente curiosidad por saber qué mecanismo evita que las anguilas se electrocuten a sí mismas. Aunque nadie parece conocer todos los detalles, el lector va por buen camino. No cabe duda de que en el cuerpo del animal hay zonas de resistencia eléctrica baja junto a otras aislantes (sabemos que estas últimas existen alrededor de los electrocitos, las baterías biológicas de la anguila).*

Al respecto, solamente puedo decir lo siguiente: las anguilas parecen protegerse a sí mismas solo a duras penas. En ocasiones se observa que una anguila que se ha enrollado sobre sí misma para amplificar el efecto eléctrico sobre su presa acaba sacudiendo las aletas con cada descarga de alto voltaje. Por tanto, incluso la anguila parece electrocutarse, aunque solo sea levemente.

LA ANTÁRTIDA Y EL NIVEL DEL MAR

«¿Se está desmoronando la Antártida?», de Richard B. Alley [Investigación y Ciencia, septiembre de 2019], argumenta que la fusión del glaciar Thwaites, en la Antártida occidental, causaría una elevación del nivel del mar de unos 3,5 metros. Sin embargo, no consigo reproducir los cálculos.

Por simplicidad, consideremos que un kilómetro es la diezmilésima parte de la distancia entre el Polo y el ecuador, tal y como fue definido originalmente. Esto nos da una longitud para la circunferencia terrestre de 40.000 kilómetros, lo que implica un radio de unos 6400 kilómetros y una superficie total de aproximadamente 510 millones de kilómetros cuadrados. Los océanos cubren cerca del 70 por ciento de esa superficie, lo que equivale a unos 360 millones de kilómetros cuadrados de superficie oceánica (una búsqueda en Google permite confirmar esta cifra).

«¿CÓMO SE PROTEGE LA ANGUILA DE SUS PROPIAS DESCARGAS ELÉCTRICAS? ¿SE HALLA SU SISTEMA NERVIOSO AISLADO O PROTEGIDO DE ALGUNA MANERA?»

En el mapa, el glaciar se asemeja a un triángulo rectángulo con catetos de unos 600 kilómetros, lo que supone un área de 180.000 kilómetros cuadrados. En lo que sigue supondré que solo cuenta la porción del glaciar que se halla por encima del nivel del mar.

El artículo afirma que el glaciar alcanza hasta 1,6 kilómetros sobre dicho nivel. Pero habrá lugares, como la costa, donde claramente no podrá ser tan alto, así que podemos asignarle una altitud media de 1,5 kilómetros. Mi estimación del volumen del glaciar sobre el nivel del mar asciende, por tanto, a unos 270.000 kilómetros cúbicos. Aun omitiendo el agua adicional que haría falta para invadir las zonas costeras, ese volumen solo bastaría para elevar el nivel del mar en unos 0,7 metros.

No pretendo afirmar que mi cálculo sea exacto, pero el resultado se aleja del dato ofrecido por Alley en un factor de 5. ¿Qué estoy omitiendo?

Dan Graifer

Responde Alley: *Los cálculos del lector son básicamente correctos. Sin embargo, el verdadero proceso sería más complejo. Hoy en día, la Antártida occidental se ve drenada por hielo que fluye en otras direcciones, como hacia las plataformas de Ross y de Filchner-Ronne, y también hacia el Thwaites. A lo largo de las partes más elevadas del casquete glacial discurren las llamadas divisorias continentales, las cuales separan las diferentes zonas de drenaje. Si el Thwaites se fundiera hasta la divisoria, dejaría allí acantilados de más de un kilómetro de altura que no serían estables. Hoy, tanto nuestra comprensión física del fenómeno como los distintos modelos nos dicen que, si se fundiese una de las principales cuencas de drenaje de la Antártida occidental, se abriría un acceso al hielo que ahora se halla en otras zonas de drenaje, lo que acabaría fundiendo las cuencas marinas de todas ellas. Al tener en cuenta estos procesos, el resultado final arroja, sin demasiada incertidumbre, una subida del nivel del mar de unos 3,3 metros.*

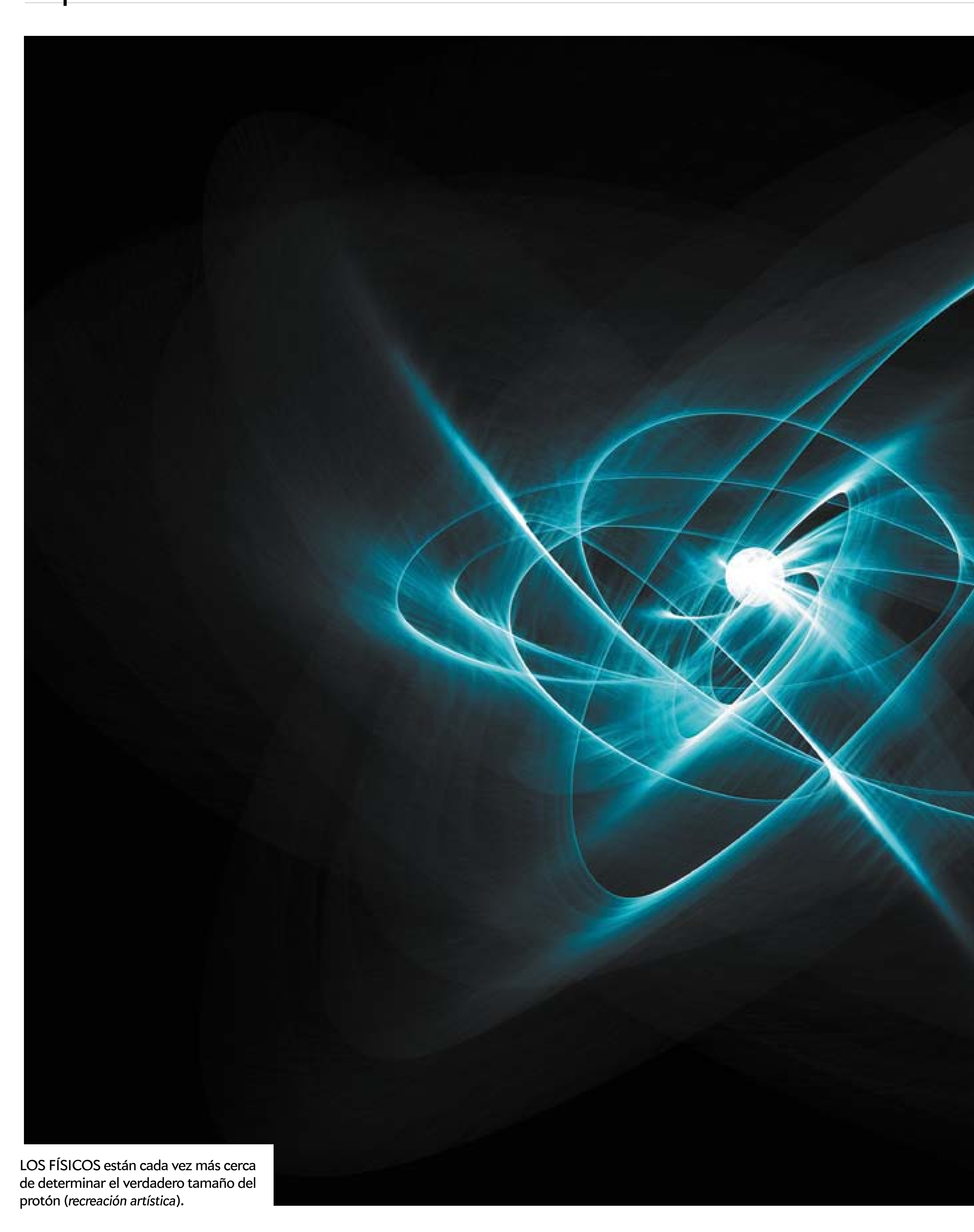


Septiembre 2019

CARTAS DE LOS LECTORES

Investigación y Ciencia agradece la opinión de los lectores. Le animamos a enviar sus comentarios a:
PRENSA CIENTÍFICA, S. A.
Muntaner 339, pral. 1.a, 08021 BARCELONA
o a la dirección de correo electrónico:
redaccion@investigacionyciencia.es

La longitud de las cartas no deberá exceder los 2000 caracteres, espacios incluidos. Investigación y Ciencia se reserva el derecho a resumirlas por cuestiones de espacio o claridad. No se garantiza la respuesta a todas las cartas publicadas.



LOS FÍSICOS están cada vez más cerca de determinar el verdadero tamaño del protón (*recreación artística*).



GETTY IMAGES

FÍSICA

¿Cuánto mide el protón?

Un nuevo trabajo apunta al final de una larga polémica sobre el tamaño de esta partícula

A los científicos les encanta la precisión. Pueden medir la distancia entre la Tierra y la Luna con una incertidumbre de centímetros o incluso milímetros y el período de púlsares distantes con un error de fracciones de microsegundos. Sin embargo, no parece que los átomos cercanos se dejen estudiar con la misma precisión. Los físicos llevan más de medio siglo intentando determinar el tamaño del protón, la partícula con carga positiva que se encuentra en todos los núcleos atómicos. Sin embargo, ese objetivo se ha demostrado terriblemente difícil, y algunos resultados incompatibles entre sí han dejado perplejos a los investigadores. Ahora, una medición ultraprecisa llevada a cabo en la Universidad de York, en Toronto, tal vez haya resuelto el problema.

Un protón mide menos de dos billonésimas de milímetro de ancho, por lo que determinar su radio requiere usar técnicas muy complejas. Una de ellas consiste en disparar un haz de electrones contra un átomo de hidrógeno, cuyo núcleo está compuesto por un único protón; al hacerlo, los distintos ángulos con los que los electrones salen rebotados permiten inferir el tamaño de la partícula. Otra estrategia se basa en la espectroscopía, es decir, en medir la radiación emitida o absorbida por un átomo en varias frecuencias. Por ejemplo, es posible excitar el electrón de un átomo de hidrógeno para que alcance un estado de mayor energía, y estudiar

con detalle la frecuencia de la radiación necesaria para que se produzca esa transición. Y, al igual que antes, la magnitud de ese «salto» entre los niveles energéticos puede depender del tamaño del protón.

Distintas mediciones basadas en ambas técnicas y que se remontan a los años cincuenta del siglo pasado fijaron el radio del protón en 0,88 femtómetros (10^{-15} metros). En 2010, sin embargo, un grupo de investigadores dirigido por Randolf Pohl, por entonces en el Instituto Max Planck de Óptica Cuántica de Garching, intentó algo nuevo. Emplearon el método espectroscópico pero no con hidrógeno normal, sino con «hidrógeno muónico»: un tipo especial de hidrógeno en el que el electrón ha sido sustituido por un muon, una partícula de carga negativa y unas 200 veces más masiva que el electrón.

Dado que el muon atrae al protón con más fuerza que el electrón, los niveles de energía del hidrógeno muónico son más sensibles al tamaño del protón y ofrecen resultados más precisos. Además, la transición concreta que estudiaron reveló el radio del protón de manera más directa que otras. Pero, para su sorpresa, Pohl y su equipo hallaron un radio de 0,84 femtómetros: un valor menor de lo esperado y bastante alejado del intervalo de posibles tamaños establecido en experimentos previos.

El resultado de Pohl causó perplejidad. ¿Existía algún error en las mediciones anteriores? ¿O tal vez había algo peculiar en la manera en que los protones interaccionan con los muones? Esta última posibilidad era la más fascinante, ya que implicaría física desconocida y podría exigir una modificación del modelo estándar [*véase* «El problema del radio del protón», por Jan C. Bernauer y Randolf Pohl; Investigación y Ciencia, abril de 2014]. «Todo el mundo se entusiasma cuando los datos muestran una discrepancia», comenta David Newell, físico del Instituto Nacional de Estándares y Tecnología de EE.UU. cuyo trabajo se ha centrado en determinar el valor de la constante de Planck, otro parámetro fundamental de la física atómica.

Ese desacuerdo llamó la atención de Eric Hessels, el líder del equipo de la Universidad de York, que hace una década se encontraba en la conferencia donde Pohl anunció sus resultados. Hessels se lo tomó como una especie de reto personal y trabajó para reproducir el experimento con hidrógeno normal en vez de muónico, pero usando la misma transición entre niveles de energía: un salto conocido como «desplazamiento de Lamb», en honor del físico Willis Lamb, quien lo midió por primera vez en los años cuarenta. Parecía claro que una medición precisa del desplazamiento de Lamb en el hidrógeno normal revelaría algo interesante. Si el radio del protón coincidía con el valor obtenido en los primeros experimentos, el resultado podría apuntar a la existencia de nueva física. Si concordaba con el valor

---

ÓPTICA

Mejores fotos submarinas

Un nuevo algoritmo dota de colores reales a las fotografías subacuáticas

Los arrecifes de coral están entre las formaciones vivas más complejas y coloridas de la naturaleza. Pero, como sabe cualquier fotógrafo subacuático, las imágenes que los captan sin usar luz artificial a menudo resultan azules y anodinas. El agua, incluso a poca profundidad, absorbe y dispersa de manera selectiva las distintas longitudes de onda, y eso hace que ciertos rasgos resulten difíciles de apreciar y que desaparezcan algunos colores, en especial los rojos y los amarillos. Como consecuencia, quienes estudian los corales no pueden emplear los algoritmos de aprendizaje automático que permiten identificar, contar y clasificar especies en las imágenes, lo que les obliga a recurrir a un análisis humano extremadamente laborioso.

Ahora, la ingeniera y oceanógrafa Derya Akkaynak ha desarrollado Sea-thru, un algoritmo que elimina la distorsión visual que causa el agua en las imágenes y que podría suponer importantes mejoras para los biólogos marinos que necesitan ver los colores. Akkaynak y Tali Treibitz, su directora de tesis en la Universidad de Haifa, en Israel, detallaron el proceso en un artículo presentado en junio durante una conferencia sobre visión artificial organizada por el Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (IEEE) en California.

El análisis del algoritmo Sea-thru tiene en cuenta las diferencias entre la física de la absorción y dispersión de la luz en la atmósfera y en el océano, donde las partículas con las que interacciona la luz son mucho mayores. Píxel



GRAN CABEZA DE CORAL en el estrecho de Lembeh, en Indonesia, antes (*izquierda*) y después (*derecha*) de procesar la imagen con el algoritmo Sea-thru.

que arrojaba el hidrógeno muónico, algo menor, ayudaría a determinar el tamaño del protón y resolvería un rompecabezas que se había prolongado durante casi una década.

Hessels tardó ocho años en dar con la respuesta. «Fue la medición más difícil que jamás hayamos realizado en nuestro laboratorio», explica el investigador. Hessels usó ondas de radio para conseguir la transición asociada al desplazamiento de Lamb y midió la frecuencia precisa para la que se producía dicho salto. Al final, su equipo halló un radio de 0,833 ± 0,010 femtómetros, acorde con la medición de Pohl. Los resultados se publicaron el pasado mes de septiembre en la revista *Science*.

En esta era de la «gran ciencia» —piense en el Gran Colisionador de Hadrones del CERN y su túnel de 27 kilómetros—, consuela saber que aún es posible obtener resultados importantes con experimentos de sobremesa. De hecho, el montaje de Hessels cabe en una única sala del campus.

No está claro por qué los primeros experimentos habían arrojado un valor mayor para el radio del protón. Una posibilidad es que adolecieran de errores de diseño. Otra, menos probable tras la medición de Hessels, es que la desviación se deba a fenómenos físicos desconocidos. La precisión del resultado del grupo de York y su proximidad al valor de 2010 indican que se está alcanzando un consenso para el radio del protón en torno a los valores más bajos. «Ahora disponemos de varias mediciones y comienzan a apoyar el resultado obtenido con hidrógeno muónico», afirma Hessels. «Así que la controversia está empezando a disminuir.»

Sin embargo, el debate aún no se ha extinguido del todo. Aunque el resultado de Hessels es excepcional —una de las mejores mediciones espectroscópicas realizadas con hidrógeno normal—, el de Pohl es más preciso gracias a la mayor sensibilidad que permite el hidrógeno muónico. Según los investigadores, eso significa que hay margen para experimentos todavía más precisos.

Mientras tanto, el protón aún esconde otros secretos. Por ejemplo, aunque los físicos saben que los protones y los neutrones constan de quarks que se mantienen unidos gracias a la interacción nuclear fuerte, aún ignoran numerosos aspectos de esa unión, recuerda Nilanga Liyanage, físico de la Universidad de Virginia. «Los protones son el material del que estamos hechos», prosigue Liyanage, que ha abordado el rompecabezas del radio del protón por medio de experimentos de dispersión de electrones. «El 99,9 por ciento de nuestra masa, de nosotros mismos y de todo lo que vemos en el universo, proviene de los protones y los neutrones.» Y el radio del protón es un parámetro clave, añade. «Es una partícula de enorme importancia y necesitamos entenderla bien.»

—Dan Falk

---

a píxel, el programa invierte la distorsión causada por el agua, gracias a lo cual consigue recuperar los colores perdidos.

Una limitación del nuevo método es que, para funcionar, la máquina debe tener información sobre las distancias que aparecen en la imagen. Para obtenerlas, Akkaynak toma numerosas fotografías de la misma escena desde varios ángulos, gracias a lo cual el algoritmo puede calcular la distancia entre la cámara y los objetos, así como la atenuación de la luz causada por el agua. Por fortuna, muchos científicos ya recogen información sobre las distancias en sus conjuntos de datos fotográficos mediante un proceso llamado fotogrametría, y Akkaynak asegura que el programa podrá usarse directamente con esas imágenes.

DERYA AKKAYNAK



«Trabajar bajo el agua presenta numerosos retos que nos sitúan en clara desventaja con respecto a quienes investigan en tierra», asegura Nicole Pederson, investigadora del 100 Island Challenge, un proyecto de la Universidad de California en San Diego en el que los científicos toman hasta 7000 imágenes de cada cien metros cuadrados para crear modelos tridimensionales de los arrecifes. Pederson lamenta que su trabajo se haya visto obstaculizado por la falta de herramientas informáticas para procesar estas imágenes, y añade que Sea-thru representa un paso en la dirección correcta.

El algoritmo difiere de aplicaciones como Photoshop, que permite a los usuarios mejorar artificialmente las imágenes subacuáticas añadiendo rojos o amarillos de manera uniforme. «Lo que me gusta de este método es que se basa en obtener los colores reales», valora Pim Bongaerts, biólogo experto en corales de la Academia de Ciencias de California. «Eso podría ayudarnos a sacarle mucho más partido a los conjuntos actuales de datos.»

—Erik Olsen

VISUALIZACIÓN DE DATOS

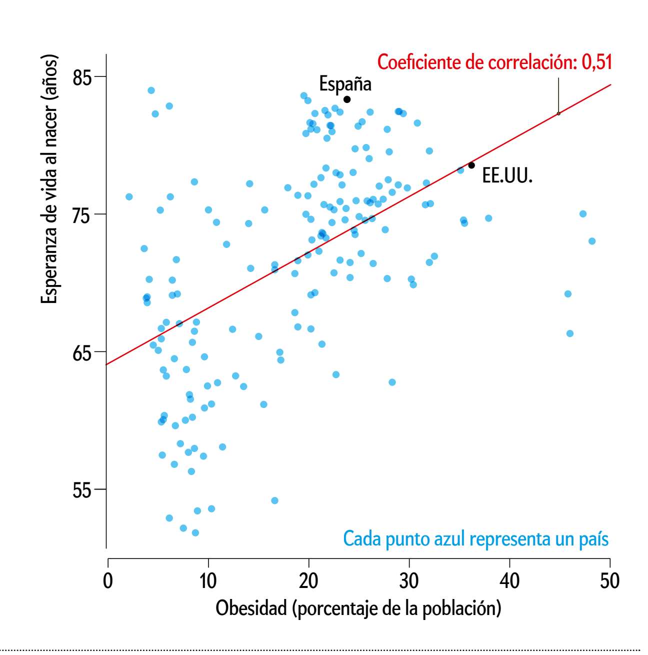
¿La obesidad acorta la vida?

Una mala interpretación de las gráficas puede reforzar la percepción sesgada de la realidad

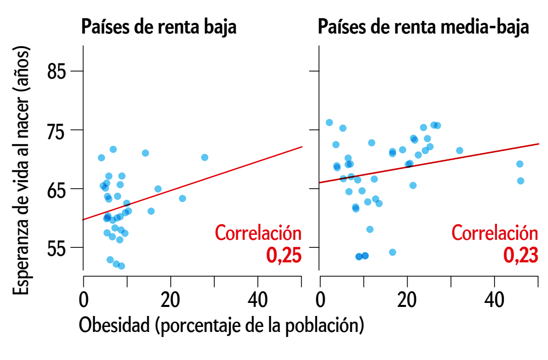
El dicho «Una imagen vale más que mil palabras» nos impulsa a creer que podemos interpretar con acierto todos los gráficos. Pero estos se prestan a una explicación errónea si no ponemos gran atención. Alberto Cairo, periodista gráfico de la Universidad de Miami, revela las trampas en las que podemos caer en el ejemplo ilustrado aquí.

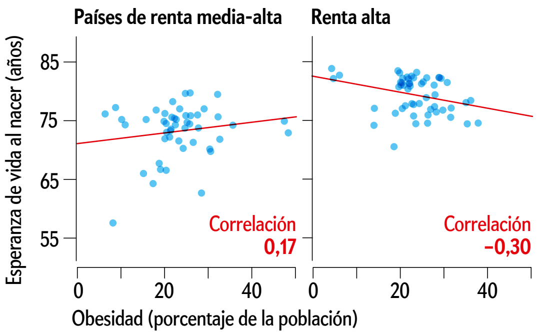
Imaginemos que es usted obeso, harto de que la familia, los amigos y el médico le digan que la obesidad agrava el riesgo de padecer diabetes, cardiopatías y hasta cáncer, enfermedades que acortan la vida. Un buen día ve la gráfica de la derecha y, de repente, se siente aliviado porque le muestra que, en términos generales, cuanto más obesa es la población de un país mayor es la esperanza de vida. Pensará que las personas obesas son más longevas. Al fin y al cabo, la correlación (*recta roja*) es bastante patente.

El gráfico en sí no es incorrecto, pero no refleja realmente que cuanto más obesa es una población, más tiempo se vive. Una descripción más acertada sería: «A escala nacional, país por país, existe una relación directa entre la obesidad y la esperanza de vida al nacer, y viceversa». Aun así, eso no significa que tal relación se sostenga a escala local o individual, pues entran en juego dos falacias.

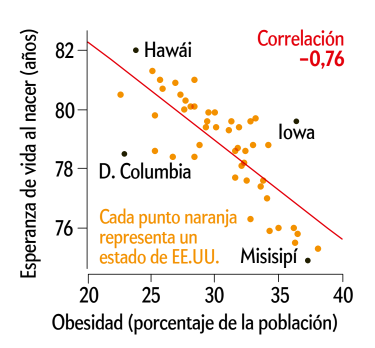


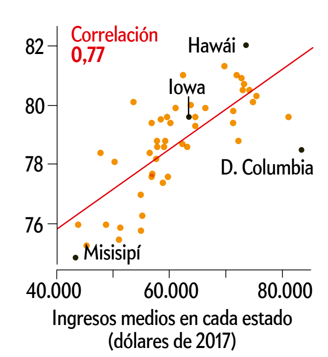
La primera es que una tendencia en los datos globales puede desaparecer o incluso invertirse si estos se examinan con detalle. Si los países se separan según el nivel de ingresos, la estrecha correlación directa se torna mucho más laxa conforme aumenta la riqueza. En los países más prósperos (*abajo a la derecha*), la relación se invierte: cuanto mayor es la incidencia de la obesidad, menor es la esperanza de vida.





Esa relación negativa se mantiene si uno observa cada uno de los estados de EE.UU.: la esperanza de vida al nacer disminuye conforme la obesidad aumenta (*izquierda*). Pero esto oculta la segunda falacia: en esa relación inversa influyen muchos otros factores. El acceso a la atención sanitaria, así como el ejercicio físico, aparecen vinculados con la esperanza de vida, igual que los ingresos económicos (*derecha*). La idea falsa radica en intentar determinar el riesgo individual analizando datos generales que no reflejan las circunstancias de cada cual. Si, en lugar de eso, usted viera datos referentes a individuos dentro de una amplia muestra de personas seleccionadas al azar, podría descubrir que la obesidad guarda relación, o no, con la esperanza de vida en alguien de su condición.





Qué hacer

1. Intente ver no solo lo que la gráfica le muestra, sino también lo que no le está mostrando.
2. No tenga prisa en llegar a conclusiones, sobre todo si la gráfica parece confirmar sus ideas preconcebidas.
3. Pregúntese si está verbalizando correctamente el contenido de la gráfica.
4. Piense si los datos representan el nivel necesario para extraer las deducciones que busca. Si desea saber algo sobre un país, consulte datos a escala nacional, pero si quiere averiguar algo acerca de su propio riesgo en cuanto a un tema de salud, busque datos referentes a personas. Y, sea como fuere, recuerde siempre que, ya sea ante una gráfica o ante cualquier tipo de datos, la correlación no implica causalidad.

Texto y gráficos de Alberto Cairo

ASESOR: HEATHER KRAUSE DATASSIST; FUENTES: «ASSOCIATION BETWEEN CLASS III OBESITY (BMI OF 40–59 KG/M^2) AND MORTALITY: A POOLED ANALYSIS OF 20 PROSPECTIVE STUDIES», CARI M. KITAHARA ET AL. EN *PLOS MEDICINE*, 8 DE JULIO DE 2014; CIA WORLD FACTBOOK (*incidencia de la obesidad a escala mundial, 2016*); BANCO MUNDIAL (*esperanza de vida al nacer y categorías de los grupos de renta, 2016*); CDC (*incidencia de la obesidad en EE.UU., 2017*); HOW CHARTS LIE: GETTING SMARTER ABOUT VISUAL INFORMATION, ALBERTO CAIRO, W. W. NORTON, OCTUBRE DE 2019; SIN DATOS DE WISCONSIN Y MAINE.

MEDICINA

Plasma contra el cáncer

Un bisturí de alta energía permite destruir las células tumorales resistentes

Cuando el cirujano extirpa un tumor pueden quedar células malignas que actúen como el germen de otro nuevo. Acaba de comenzar el primer estudio clínico con un nuevo instrumento con el que se espera acabar con esas células recalcitrantes: el bisturí de plasma.

Del tamaño de un bolígrafo, el ingenio emite un fino chorro de helio cuyas partículas cargadas brillan con un vivo tono violeta. El electrodo situado en la punta divide los átomos de ese elemento convirtiéndolos en un haz de plasma de iones positivos y electrones.

A diferencia del plasma solar, los iones del bisturí se mueven con relativa lentitud, por lo que el chorro se percibe al tacto como una brisa fresca. Pero, en realidad, los electrones rebosan de energía y transforman el oxígeno y el nitrógeno del aire en especies reactivas, como el superóxido, el óxido nítrico o el oxígeno monoatómico. Estas interrumpen reacciones esenciales del metabolismo y entorpecen la división celular, y se ha visto que tales efectos perjudican mucho más a las células cancerosas que a las sanas. Durante la operación, el bisturí solo puede aplicarse breves minutos en el lecho tumoral, explica Jerome Canady, cirujano de Washington D.C. y miembro del equipo de inventores. «Pulverizamos la zona con el plasma para matar todos los tumores microscópicos.»

El plasma frío ya se emplea para combatir infecciones y esterilizar heridas, y el más energético corta limpiamente los tejidos y los cauteriza. Hace tiempo que se andaba detrás de su aplicación contra el cáncer, por lo que el nuevo estudio supone un hito importante, según Mounir Laroussi, que investiga los efectos biológicos del plasma frío en la Universidad Old Dominion: «Es un gran paso adelante».



JEROME CANADY, INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN DE CIENCIAS TECNOLÓGICAS Y BIOLÓGICAS AVANZADAS

EL BISTURÍ de plasma destruye las células cancerosas.

En los últimos años, los facultativos habían usado estos bisturíes de plasma en tres pacientes oncológicos con fines compasivos, tras el fracaso de los demás tratamientos. Canady explica que el plasma mató las células malignas residuales de esas personas. Pero todavía falta que un estudio clínico en regla aporte datos vitales sobre la seguridad y los efectos a largo plazo, como él y sus colaboradores han empezado a hacer. En el ensayo, pretenden operar con el bisturí a 20 pacientes con tumores sólidos avanzados, de páncreas, ovario o mama.

Laroussi aclara que se tardó más de una década de trabajos de laboratorio con cultivos celulares y animales para preparar el uso clínico del bisturí de plasma. Ha sido preciso identificar las sustancias que genera, medir su penetración en los tejidos y saber de qué modo altera las células tumorales. «Hay que aplicarlo con mesura, pues de lo contrario acabaría destruyendo tanto células cancerosas como sanas.» Espera que el estudio demuestre que es posible ajustar finamente el instrumento para que no cause daños.

—Mark Peplow

HISTORIA DE LA CIENCIA

La herencia de Alexander von Humboldt

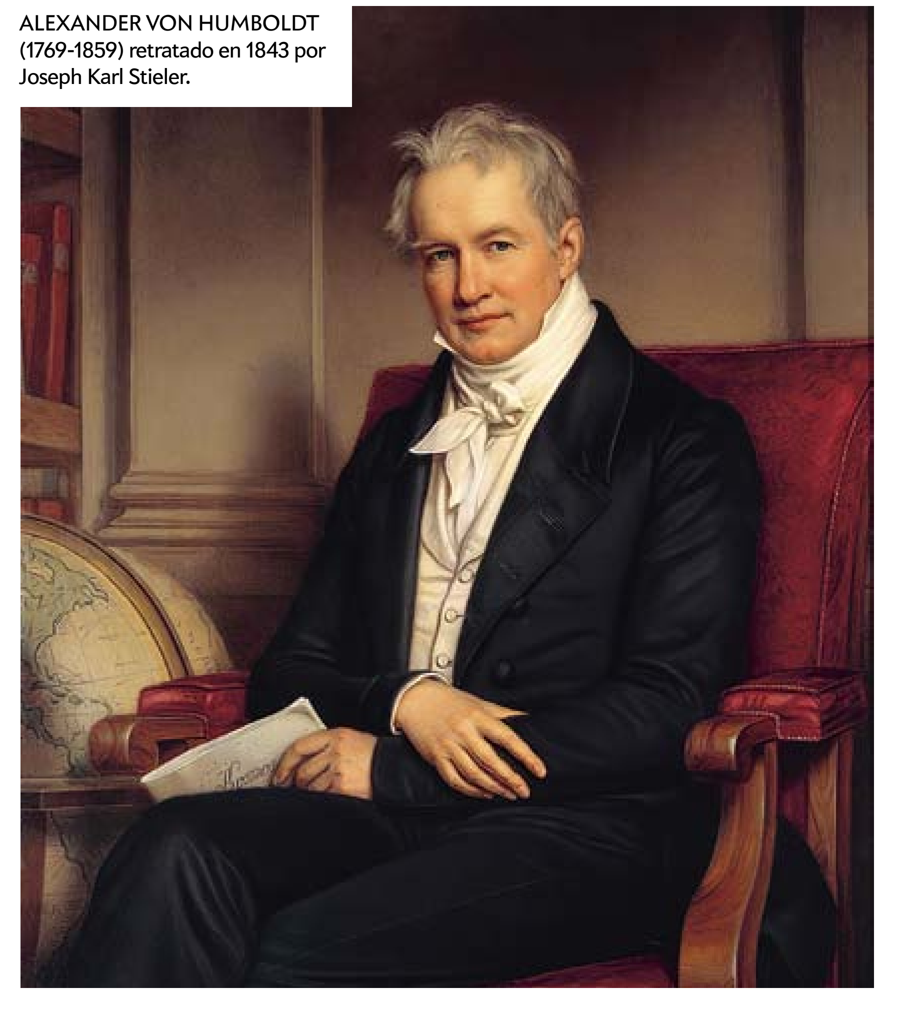
Este año hemos celebrado 250 años del nacimiento de uno de los mayores eruditos de todos los tiempos. La ubicuidad de su legado ha hecho que a menudo este pase inadvertido

Alexander von Humboldt nació el 14 de septiembre de 1769, hace ahora 250 años. Y no deja de resultar incomprensible que, hoy, este gran naturalista no disfrute de la fama de la que gozó en vida. Aún en 1869, con motivo de su centenario, cientos de miles de personas de todo el mundo participaron en las celebraciones. En el Central Park de Nueva York se congregaron 25.000 almas con motivo de la inauguración de un busto suyo. En Pittsburgh, el presidente de los Estados Unidos, Ulysses Grant, conmemoró al investigador alemán junto a otros 10.000 asistentes a una fiesta en su honor. En Egipto hubo ceremonias con fuegos artificiales. En Australia, Argentina, México y Rusia tuvieron lugar actos y desfiles. Y Berlín albergó un homenaje en el que participaron 80.000 personas.

Hoy resulta difícil imaginar una celebración semejante por un científico. Sin embargo, una posible explicación tal vez sea que hemos interiorizado hasta tal punto sus investigaciones que ya ni siquiera nos percatamos de lo revolucionarias que fueron. Podemos entenderlo con la fórmula

$$T = \text{constante},$$

donde T denota la temperatura. Por supuesto, muy a menudo la temperatura varía: cambia en el transcurso del día o dependiendo de si la medimos en un desierto, un bosque o en lo alto de una montaña. Pero el mérito de Humboldt radicó, entre otras cosas, en proporcionarnos una visión mucho más completa del mundo.



ALEXANDER VON HUMBOLDT (1769-1859) retratado en 1843 por Joseph Karl Stieler.

En sus viajes por América del Norte, América del Sur, Europa y Asia lo investigó todo. Midió montañas y ríos, estudió volcanes y terremotos, observó las estrellas del cielo, catalogó plantas y animales, midió la temperatura y la presión atmosférica y creó registros meteorológicos. Se ocupó de las lenguas de los pueblos que conoció y también de su cultura, su agricultura y sus sistemas políticos [*véase* «Von Humboldt: el científico universal», por J. M. Sánchez Ron, *en este mismo número*]. Su visión del mundo era tanto microscópica como global, y demostró que la una no tenía sentido sin la otra. Todas las cosas están relacionadas entre sí: incluso las criaturas más pequeñas pueden influir en los fenómenos globales, y viceversa. Lo que inició Humboldt fue, en esencia, la ciencia que hoy llamamos ecología.

Si alguien desea descubrir las leyes de la naturaleza, lo primero que debe entender es qué constituye la norma y qué fenómenos se desvían de ella. Por ello, Humboldt intentó clasificar y promediar matemáticamente un amplio abanico de mediciones. Dividió el mundo en zonas climáticas, lo que dio lugar a su célebre mapa de los Andes donde muestra que la vegetación y el clima cambian no solo con la latitud, sino también con la altura. A partir de ahí desarrolló los mapas de isotermas; esto es, líneas de temperatura constante, definidas por la fórmula anterior, que él dibujó por primera vez. Puede que la temperatura fluctúe sin cesar, pero cuando uno registra los valores medios y los conecta geográficamente, obtiene una visión completamente nueva de las propiedades de la atmósfera.

Hoy estamos acostumbrados a ver isotermas en los mapas del pronóstico meteorológico, y lo mismo ocurre con otros muchos hallazgos de Humboldt. Pueden parecer modestos, pero eso solo refleja hasta qué punto se han instalado en nuestra vida y nuestros pensamientos. «Todo es interacción», escribió Humboldt en 1803. En un mundo amenazado por el cambio climático, la extinción de las especies y otros desastres ecológicos, esta conclusión sigue siendo tan vigente hoy como entonces.

—Florian Freistetter

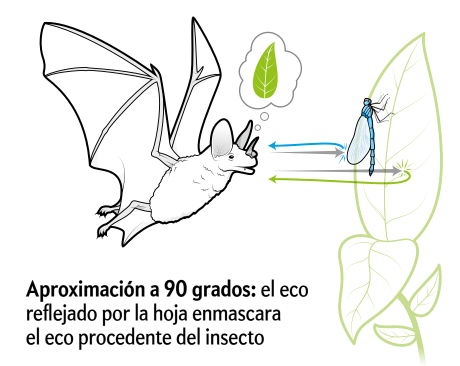
COMPORTAMIENTO ANIMAL

Ecolocalizar a presas quietas

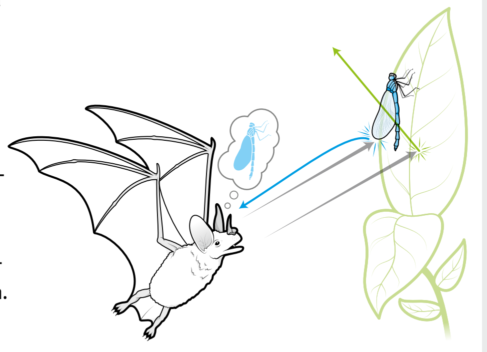
Ciertos ángulos de acercamiento ayudan a los murciélagos a cazar insectos posados en las hojas

Es sabido que los murciélagos atrapan al vuelo insectos en plena noche, entre la espesura del bosque incluso, gracias a las ondas sonoras de alta frecuencia que emiten. Pero más del 40 por ciento de los quirópteros insectívoros también capturan presas que reposan quietas en las hojas y otras superficies. Como las ondas que rebotan en la vegetación se dispersan en todas direcciones, el eco de retorno debería hacer virtualmente imperceptible a cualquier insecto posado en una hoja, por lo que los especialistas sospechaban que el cazador alado debía servirse de pistas visuales u olorosas o de los sonidos producidos por la presa inmóvil para dar con ella.

Ahora, los biólogos Inga Geipel, del Instituto Smithsoniano de Investigación Tropical, y Ralph Simon, de la Universidad de Ámsterdam, y sus colaboradores han demostrado que algunos murciélagos detectan los insectos posados en una hoja, inmóviles y silenciosos, únicamente con la ecolocalización. Si se acerca a su objetivo siguiendo una trayectoria concreta, el murciélago orejudo *Micronycteris microtis* encuentra en la hoja un espejo acústico que dispersa los ecos indeseados fuera de su ángulo de ataque. Así, el eco del insecto destaca por encima de los demás, según un estudio publicado en agosto en *Current Biology*.



Aproximación a 90 grados: el eco reflejado por la hoja enmascara el eco procedente del insecto



Aproximación a 60 grados: el eco de la hoja se aleja del murciélago y no oculta el del insecto, que queda al descubierto

«Los ecos de la presa llegan reforzados a los oídos del cazador, mientras que los procedentes del follaje quedan amortiguados», explica John Ratcliffe, biólogo animal de la Universidad de Toronto, ajeno al nuevo trabajo.

Los autores sembraron una sala de micrófonos y registraron el modo en que las ondas sonoras generadas por un sónar sintético que simulaba a un murciélago eran reflejadas por una hoja. Vieron que las ondas rebotaban en la hoja en una dirección que se alejaba de la fuente. Pero cuando un insecto se posaba en ella, los impulsos emitidos en ángulos cercanos a los 60 grados con respecto a la vertical eran reflejados hacia la fuente emisora del sónar. Como paso siguiente, filmaron a cuatro murciélagos silvestres atrapando libélulas posadas en hojas. «Se aproximaron a sus presas exactamente desde los ángulos previstos», explica Simon. Fuera de esos arcos, el blanco era mucho más difícil de detectar.

No es la primera vez que se observa ese aprovechamiento de las ondas rebotadas por una superficie; los murciélagos que se alimentan en los lagos y estanques recurren a un proceso parecido para detectar las presas que flotan. Pero la táctica depende de la gran superficie lisa que ofrece el agua. Además, el murciélago no tiene que maniobrar con gran pericia para acercarse en el ángulo correcto. «Resulta interesante saber que ese mismo proceso se ha adoptado en un ambiente muy distinto», afirma la neurocientífica Michaela Warnecke de la Universidad de Wisconsin en Madison, que ha investigado la ecolocalización pero no ha participado en el estudio.

No sabemos si la táctica de *M. microtis* es única entre los quirópteros, afirma Ratcliffe. Pero este trabajo nos ayuda a revelar el mundo acústico de estos mamíferos voladores, lo que puede derivar en aplicaciones nuevas, como sistemas de sónar inspirados en sus habilidades, según los autores del estudio.

—*Rachel Berkowitz*

BROWN BIRD DESIGN (*murciélagos*); FORGES (*viñeta*)

AGENDA

CONFERENCIAS

11 de diciembre
Creatividad computacional
Ramon López de Mántaras, CSIC
Museo de la Evolución Humana
Burgos
www.csic.es

12 de diciembre
Los elementos químicos en el cine, en la literatura y en el arte
Bernando Herradón, CSIC
Museo de las Ciencias
Valencia
www.cac.es

19 de diciembre
Grafeno de ángulo mágico: El *twist and shout* de los materiales cuánticos
Pablo Jarillo-Herrero, Instituto de Tecnología de Massachusetts
Fundación Ramón Areces
Madrid
www.fundacionareces.es

EXPOSICIONES

Construyendo la tabla periódica
Museo de Ciencias Naturales
Universidad de Zaragoza
Zaragoza
museonat.unizar.es

La ciencia según Forges
Edificio central del CSIC
Madrid
www.csic.es



OTROS

14 de diciembre — Jornada
Homo curiosus
Charlas, documentales y experiencias
Palacio Euskalduna
Bilbao
homocuriosus.es

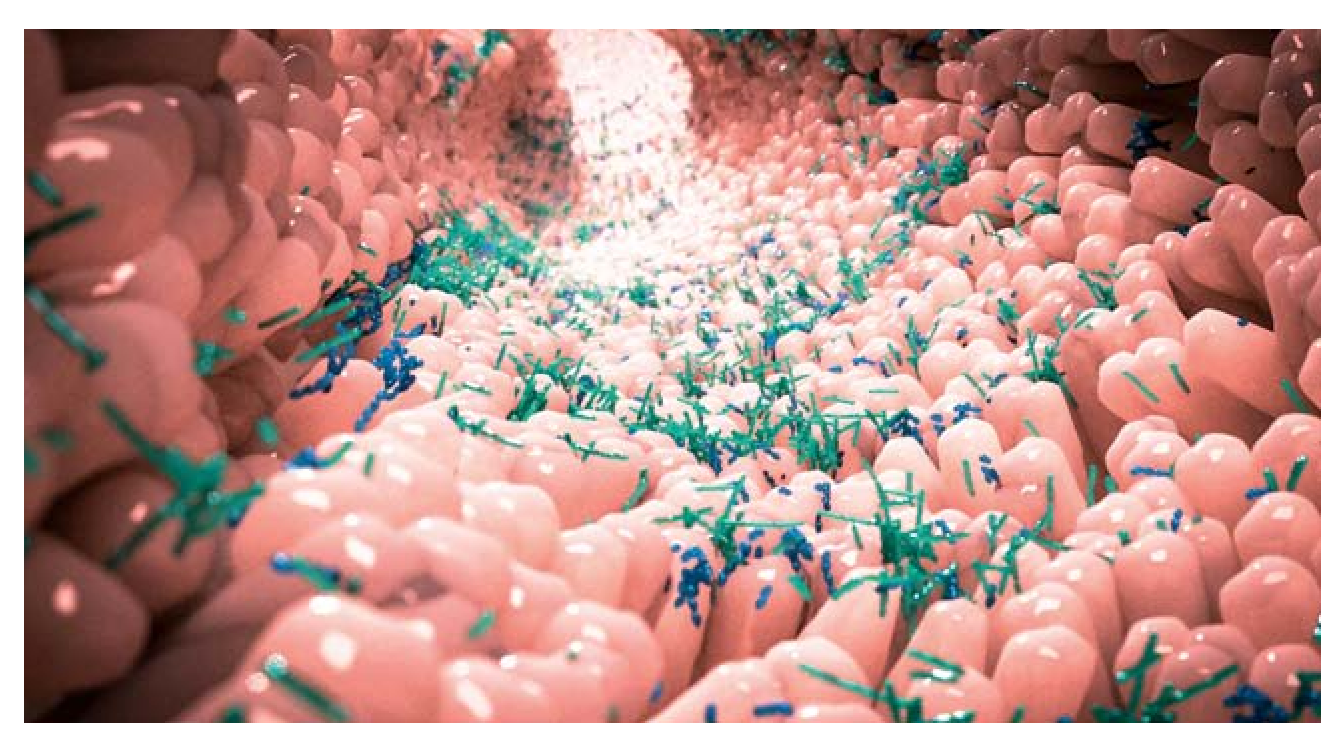
27 de diciembre — Actividad
Escape room
Para niños de 10 a 14 años
Museo de Ciencias Naturales
Barcelona
museuciencies.cat

MICROBIOLOGÍA

Siguiendo la pista a humanos y microbios

La segunda fase del Proyecto Microbioma Humano muestra las alteraciones microbianas asociadas a varios procesos patológicos

VERÓNICA LLORÉNS-RICO Y JEROEN RAES



LAS ALTERACIONES DE LA MICROBIOTA del epitelio intestinal (*arriba*) asociadas a la enfermedad inflamatoria intestinal han sido una de las cuestiones abordadas en la segunda fase del Proyecto Microbioma Humano.

GETTY IMAGES/MARCIN KLAPCZYNSKI/ISTOCK

La medicina de precisión puede definirse como «una estrategia emergente de tratamiento y prevención de enfermedades que tiene en cuenta la variabilidad individual en los genes, el ambiente y el estilo de vida de cada persona». Ahora, varios estudios del Proyecto Microbioma Humano Integrativo (iHMP, por sus siglas en inglés), de los Institutos Nacionales de la Salud de Estados Unidos, proporcionan un recurso de datos microbianos y humanos relacionados con la progresión de dos enfermedades (diabetes de tipo 2 y enfermedad inflamatoria intestinal) y el embarazo. Tal recurso contribuirá a conocer los microorganismos asociados a un hospedador y las interacciones que establecen con él, lo que será de gran valor para las estrategias de la medicina de precisión del futuro. Los estudios se han publicado en varios artículos en *Nature* y *Nature Medicine*.

Conocimiento previo

Durante muchos años, la investigación sobre enfermedades crónicas se había centrado exclusivamente en células y procesos humanos. Pero, hace casi una década, el análisis de los microorganismos que viven en el cuerpo (la microbiota) y de sus genomas colectivos (el microbioma) dio lugar a informes destacables, como el del Proyecto Metagenómica del Sistema Intestinal Humano (MetaHIT), de la Unión Europea, y el Proyecto Microbioma Humano (HMP), de Estados Unidos. Como consecuencia de ellos, la atención pasó a la posible relación entre la microbiota y las enfermedades humanas. Esos trabajos respondieron al impulso que experimentó la investigación microbiológica a raíz de los avances en las herramientas de análisis molecular y genómico, un impulso que no ha cesado desde entonces.

Desde la publicación de la primera oleada de artículos fundamentales sobre el microbioma, el conocimiento de los habitantes microbianos de nuestro cuerpo ha aumentado enormemente. Con el tiempo, ha ido creciendo el tamaño de las muestras, el detalle de la cobertura genómica y la complejidad del diseño experimental. Se han desarrollado métodos de análisis adaptados a los retos específicos que plantea la manipulación de las muestras del microbioma (como el almacenamiento, el transporte y la extracción de ADN), así como a la dificultad estadística que supone tratar los

datos del microbioma. Estos avances han proporcionado una visión inicial de las complejas interacciones que se dan entre los microbios y nuestro cuerpo, así como el modo en que estos cambian en la salud y en la enfermedad. Ello ha permitido establecer la relación entre las alteraciones microbianas y la enfermedad para una amplia gama de trastornos crónicos.

Interrogantes pendientes

Sin embargo, sigue habiendo una gran brecha entre la comprensión actual de los procesos microbianos y la capacidad de aplicar dicho conocimiento al desarrollo de tratamientos. Se está produciendo una transición que debería permitirnos pasar de tener solo información sobre asociaciones con enfermedades a entender los mecanismos que las causan.

El conocimiento insuficiente está obstaculizando esa transición de tres maneras. En primer lugar, la mayoría de los estudios se han centrado en identificar las especies que componen la microbiota humana y, en menor medida, el «potencial funcional» codificado por el microbioma, (por ejemplo, las enzimas codificadas por él que podrían dar lugar a ciertas moléculas). No obstante, rara vez determinan la actividad real de la microbiota, como producción o degradación de moléculas específicas en un momento dado.

En segundo lugar, la mayoría de los estudios son de tipo transversal, es decir, analizan solo una muestra por individuo. Pocos trabajos consideran la variación de la microbiota a lo largo del tiempo, y si lo hacen, suelen examinar solo un pequeño número de individuos. Se necesitan estudios que hagan un seguimiento de los cambios a lo largo del tiempo en un gran número de personas y para distintas enfermedades.

En tercer lugar, las investigaciones suelen centrarse únicamente en la microbiota humana. Raras veces se analiza el perfil conjunto del hospedador humano y la microbiota. Descuidar este aspecto es omitir una pieza importante del rompecabezas que concierne a cómo interaccionamos con nuestros habitantes microbianos.

Aunque algunos estudios superan una o dos de esas limitaciones, muy pocos abordan las tres. Aquí es donde los datos del iHMP marcan la diferencia.

Dos años después de la publicación del trabajo original del HMP en 2012, los Institutos Nacionales de la Salud decidieron que el iHMP continuase con la segunda fase de esta investigación. Al pasar de registrar la microbiota en un cuerpo sano a fijarse en la enfermedad, los investigadores abordaron tres cuestiones principales: la aparición de la diabetes de tipo 2, la enfermedad inflamatoria intestinal y la búsqueda de marcadores del parto prematuro.

En conjunto, se llevó a cabo el seguimiento de 463 personas durante períodos que abarcaron de unos pocos meses a cuatro años, y se obtuvo el perfil de muestras fecales, nasales o vaginales. Los autores identificaron las especies microbianas presentes en ellas y también evaluaron (según el tipo de estudio) el potencial funcional del microbioma analizado y la actividad de sus genes, proteínas y metabolitos.

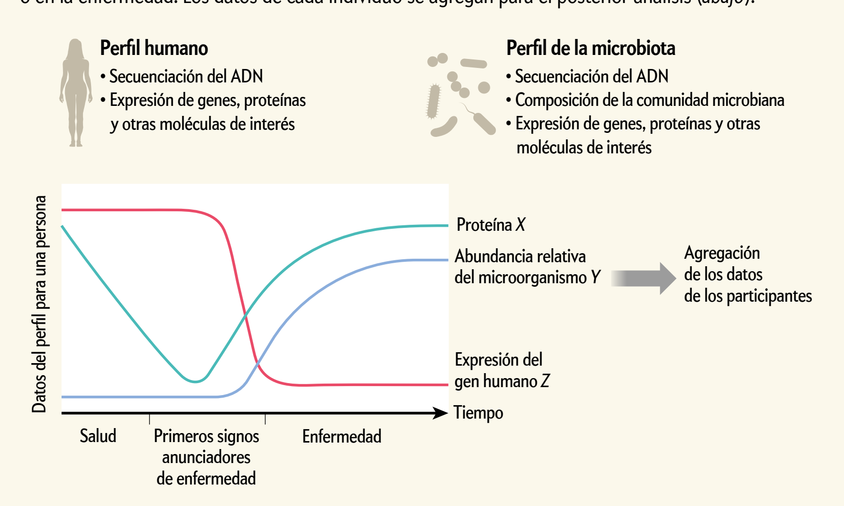
Paralelamente, también obtuvieron el perfil de los hospedadores humanos, que incluía la secuenciación de las regiones de su genoma que codifican proteínas, y el análisis de la expresión génica, de las

HACIA LA MEDICINA DE PRECISIÓN

LA SEGUNDA FASE DEL PROYECTO MICROBIOMA HUMANO se ha centrado en las alteraciones microbianas asociadas a la enfermedad. La información recopilada constituye un recurso valioso para la personalización del diágnóstico y el tratamiento.

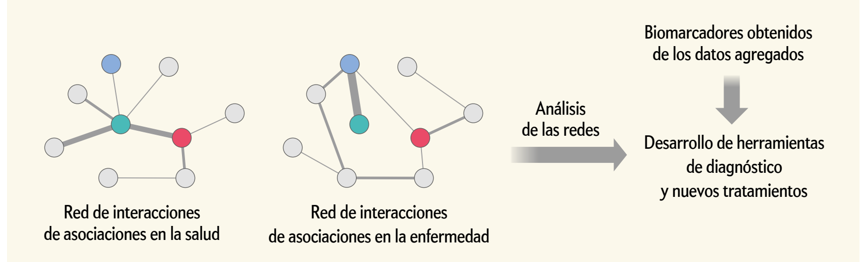
LOS DATOS DEL PROYECTO

Se analizaron numerosos parámetros, entre ellos, las secuencias de ADN y la expresión de genes, proteínas y moléculas, tanto de personas como de sus microorganismos residentes (*arriba*). Los perfiles de dichos datos proporcionan una imagen detallada de los cambios moleculares y microbianos en una persona y en sus microorganismos asociados a lo largo del tiempo, en la salud o en la enfermedad. Los datos de cada individuo se agregan para el posterior análisis (*abajo*).



RECURSO MÉDICO

Los datos agregados pueden usarse para generar redes de interacciones en diversos estados de salud o enfermedad que revelan asociaciones fuertes (*líneas gruesas*) y débiles (*líneas finas o ausentes*) entre determinadas variables. En las redes inventadas que se muestran, los puntos de color coinciden con los factores correspondientes del gráfico superior, y los blancos representan otros factores especiales. El análisis de dichas redes, o la identificación de biomarcadores a partir de otros análisis de los datos, podría llevar al desarrollo de herramientas de diagnóstico innovadoras.



citocinas (moléculas de señalización del sistema inmunitario) y de los niveles de factores de importancia clínica, como el colesterol. Aunque no pudieron obtenerse todos los datos para todos los participantes y puntos temporales, estos estudios proporcionan el seguimiento dinámico más completo hasta el momento sobre el estado de salud del huésped humano y las características de su microbiota. La generación de este rico recurso constituye un logro histórico.

La microbiota en las enfermedades

El análisis reveló interesantes tendencias en cuanto a la variación temporal de la microbiota en distintas partes del cuerpo. En el embarazo, los cambios en la composición y función de la microbiota vaginal se producen principalmente durante el primer trimestre de la gestación, con un predominio de bacterias del género *Lactobacillus* asociadas a la salud, en particular en mujeres con ascendencia africana o hispana. Curiosamente, las mujeres que presentaban niveles de algunas especies de *Lactobacillus* inferiores a los habituales eran más propensas a tener un parto prematuro. Y las personas que padecían enfermedad intestinal inflamatoria exhibieron una mayor variabilidad en la microbiota intestinal a lo largo del tiempo que aquellas sin el trastorno, si bien todas mostraban valores muy diversos de moléculas microbianas, como proteínas y metabolitos.

Aunque todavía no se conocen las causas de esa variación en la microbiota a lo largo del tiempo, algunos datos sugieren que las infecciones víricas son un posible desencadenante. En la enfermedad inflamatoria intestinal, a veces se observó un aumento de virus justo antes de la aparición de anomalías en la microbiota intestinal, que en algunos casos se relacionaron con episodios de recaída de la enfermedad. En el estudio sobre la diabetes, cuando los participantes sufrían una infección vírica, se les realizó un muestreo intenso del sistema respiratorio. Mientras que los no diabéticos experimentaron cambios concomitantes en el sistema inmunitario y las microbiotas intestinal y nasal, los que tenían riesgo de desarrollar diabetes presentaban una respuesta inmunitaria reducida y alteraciones características en la microbiota. En el futuro deberán evaluarse específicamente los efectos de la infección vírica en la variación de la microbiota a lo largo del tiempo y para determinar si la infección aumenta el riesgo de aparición o recaída de determinadas enfermedades.

Los artículos del iHMP exponen una serie de correlaciones previamente desconocidas entre los componentes de la microbiota y entre la microbiota y el hospedador. Además, presentan una cartografía de esta vasta red de asociaciones a lo largo del tiempo. Algunas de las conexiones más interesantes que se observaron en estos estudios son aquellas entre determinados microorganismos y la presencia de citocinas pro- o antiinflamatorias. Estas sustancias ofrecen pistas para desentrañar las intrincadas relaciones entre nuestro sistema inmunitario y nuestra microbiota y su actividad. Dichas asociaciones deberán seguirse para discernir si pueden establecerse relaciones directas de causa y efecto.

Un recurso valioso

Pero incluso los estudios más punteros, como los realizados por el iHMP, presentan puntos débiles. En los últimos años se han identificado factores clave que afectan a la composición de la microbiota, y aunque algunos, como la edad, se incorporaron en los análisis, otros posiblemente cruciales, como la dieta o la toma de medicamentos, no se tuvieron en cuenta. Se necesita comprobar si las asociaciones identificadas en los estudios del iHMP se ven afectadas por dichos factores. Otro punto débil es que, debido a la escala temporal del muestreo y a limitaciones prácticas, la variabilidad de la microbiota se estudió normalmente mediante muestreos periódicos, con largos intervalos entre ellos. Sin embargo, para poder utilizar dicha información en la medicina clínica y desarrollar tratamientos o herramientas de diagnóstico, será necesario conocer la variabilidad día a día.

Un problema adicional es que los datos generados se proporcionan en unidades relativas; la abundancia bacteriana se expresa como una proporción de la población microbiana total, y no por el número de células. Para vincular con precisión la actividad de la microbiota con los procesos del hospedador, se necesitará un marco de análisis cuantitativo que determine experimentalmente la abundancia absoluta de los tipos de microorganismos presentes en las muestras de la microbiota. Por último, la replicación de los resultados del iHMP en poblaciones independientes fue escasa. Cada vez hay más pruebas de que un amplio muestreo que abarque distintas regiones geográficas puede contribuir a que los resultados sean robustos y más fácilmente aplicables.

A pesar de estas limitaciones, el iHMP ha cosechado un activo de gran valor: un fantástico conjunto de datos, la mayoría de los cuales está disponible de forma gratuita. Sin duda serán un recurso útil para futuras investigaciones. Los artículos también ofrecen excelentes ejemplos del perfil personalizado y completo de muestras humanas, para los que existen pocos precedentes. Asimismo, suministran algunos datos muy necesarios que podrían servir para entrenar algoritmos o diseñar experimentos. Para desarrollar herramientas y tratamientos clínicos en este ámbito, resultará fundamental compilar indicadores de alteración de la salud a partir de una amplia gama de parámetros que se detectan con técnicas de alto rendimiento, las cuales proporcionan datos tanto de las personas como de sus microbios residentes. Después de todo, no somos solo bacterias, ¿cierto?

Verónica Lloréns-Rico *y* ***Jeroen Raes*** *son investigadores del Instituto Rega de Investigación Médica y del Centro de Microbiología del Instituto de Biotecnología de Flandes, en Lovaina.*

Artículo original publicado en *Nature* vol. 569, págs. 632-633, 2019. Traducido con el permiso de Nature Research Group © 2019

Con la colaboración de nature

PARA SABER MÁS

The Integrative Human Microbiome Project. The Integrative HMP (iHMP) Research Network Consortium en *Nature*, vol. 569, págs. 641-648, mayo de 2019.
Multi-omics of the gut microbial ecosystem in inflammatory bowel diseases. J. Lloyd-Price et al. en *Nature*, vol. 569, págs. 655-662, mayo de 2019.
Complex host-microbial dynamics in prediabetes revealed through longitudinal multi-omics profiling. W. Zhou et al. en *Nature*, vol. 569, págs. 663-671, mayo de 2019.
The vaginal microbiome and preterm birth. J. M. Fettweiss et al. en *Nature Medicine*, vol. 25, n.º 6, págs. 1012-1021, mayo de 2019.

EN NUESTRO ARCHIVO

El ecosistema microbiano humano. Jennifer Ackerman en *IyC*, agosto de 2012.
Nuestro segundo genoma. Francisco Guarner en *IyC*, diciembre de 2012.
Factores que alteran el microbioma humano. Celia Méndez-García, Andrés Moya y Manuel Ferrer en *IyC*, diciembre de 2017.

ASTRONOMÍA

¿Una galaxia sin materia oscura?

En 2018, un trabajo afirmó haber descubierto una galaxia carente de la sustancia invisible que permea el cosmos. Dos estudios recientes rebaten dicho resultado

IGNACIO TRUJILLO CABRERA



NASA/ESA/TELESCOPIO ESPACIAL HUBBLE

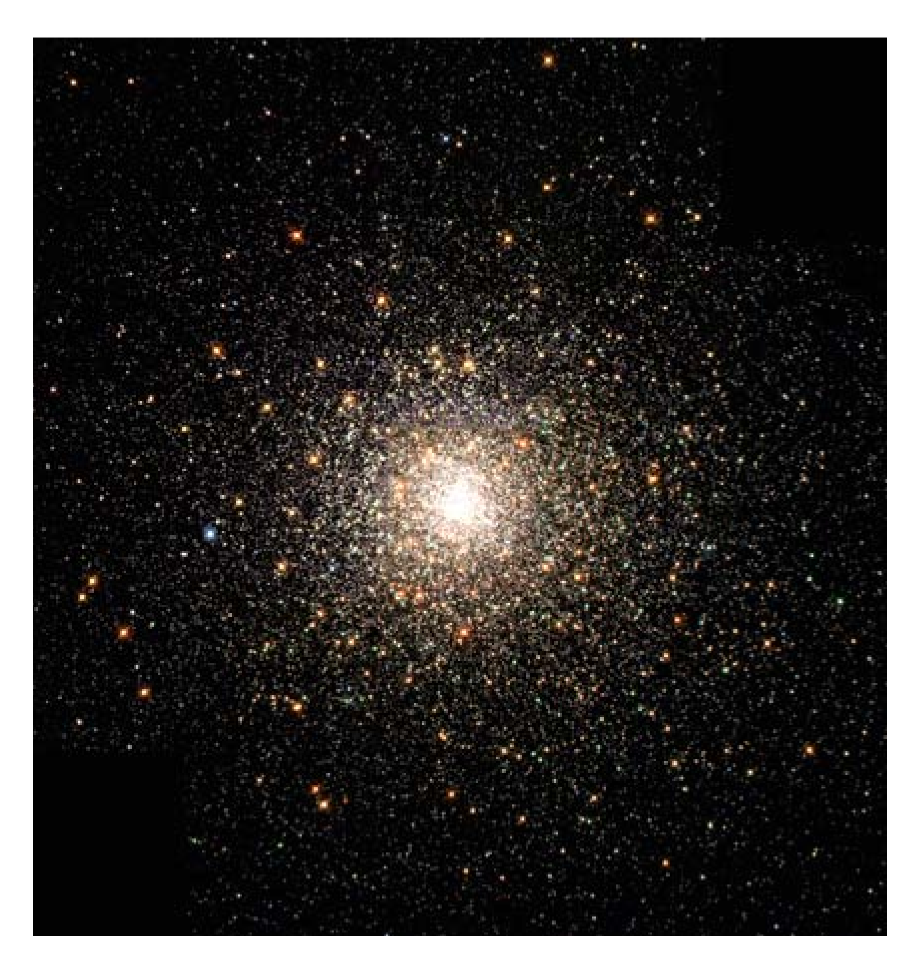
LA GALAXIA KKS2000-04 (*nube translúcida en el centro de la imagen*), también conocida como NGC 1052-DF2, es una galaxia enana ultradifusa situada en la constelación de la Ballena. En los últimos dos años, este objeto ha estado en el foco de un intenso debate que afecta a uno de los pilares de la concepción moderna del cosmos: ¿existen galaxias sin materia oscura?

El 3 de marzo de 1912 es una fecha que para la gran mayoría no trae ningún recuerdo especial. Ese día, sin embargo, la astrónoma Henrietta Leavitt publicaba en el *Harvard College Observatory Circular* una pequeña contribución que, a la postre, acabaría cambiando nuestra manera de entender el universo.

Leavitt había encontrado un resultado sorprendente: para cierto tipo de estrellas pulsantes (aquellas cuyo brillo aumenta y disminuye con el tiempo), las llamadas cefeidas, el período de pulsación dependía de su luminosidad intrínseca; es decir, de la cantidad de luz que emitían. Así pues, bastaba con medir la duración de sus pulsaciones y su brillo aparente (la fracción de luz que llega a la Tierra) para deducir la distancia a la que se encontraban. Leavitt nos proporcionó así un método fiable para medir la distancia a objetos muy lejanos, las galaxias, gracias a lo cual nuestro conocimiento del universo dio un gigantesco paso adelante. De no ser por su prematura muerte, es posible que su hallazgo le hubiera merecido un premio Nobel.

La historia del descubrimiento de Leavitt muestra hasta qué punto nuestra comprensión de los objetos astronómicos depende de la capacidad para medir cuán lejos se encuentran. Esta cuestión ha preocupado a los astrónomos desde el nacimiento de su disciplina y, aún hoy, sigue siendo uno de los mayores quebraderos de cabeza en astrofísica y cosmología: ¿cómo medir la distancia a algo que no podemos tocar?

Hace poco, el problema de la determinación de distancias en astronomía ha ocupado un papel central en una importante polémica. En 2018, un artículo publicado en la prestigiosa revista *Na-*



LOS CÚMULOS GLOBULARES son agrupaciones esféricas de estrellas que orbitan en las regiones externas de la mayoría de las galaxias conocidas (*en la imagen, el cúmulo globular M80, situado en la Vía Láctea y formado por varios cientos de miles de estrellas*). El estudio de estas agrupaciones estelares se ha demostrado clave para analizar la posible ausencia de materia oscura en la galaxia KKS2000-04.

EQUIPO DE LEGADO DEL HUBBLE/ASOCIACIÓN DE UNIVERSIDADES PARA LA INVESTIGACIÓN ASTRONÓMICA (AURA)/INSTITUTO PARA LA CIENCIA DEL TELESCOPIO ESPACIAL (STSCI)/NASA

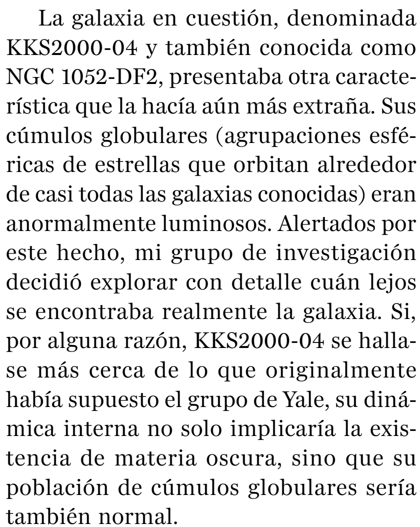
ture anunció un hallazgo sorprendente: la existencia de una galaxia sin materia oscura. El descubrimiento causó conmoción entre la comunidad astronómica, ya que la existencia de esta sustancia invisible constituye uno de los pilares de nuestro entendimiento moderno del cosmos. Sin embargo, dos trabajos recientes de nuestro grupo de investigación en el Instituto de Astrofísica de Canarias han llegado a la conclusión contraria: un cálculo más cuidadoso de la distancia a la que se encuentran las galaxias implicadas revela que estas se hallan mucho más cerca de lo supuesto inicialmente, con lo que sus propiedades anómalas desaparecen.

Una cuestión de distancia

A lo largo de la historia, la distancia a la que se hallan los diferentes objetos astronómicos ha sido fuente de innumerables polémicas. Un ejemplo fue el célebre «Gran Debate» del año 1920 entre Harlow Shapley y Heber Curtis. En él se discutía sobre la naturaleza de lo que entonces se conocía como «nebulosas espirales». Para Shapley, estas estructuras eran objetos pequeños pertenecientes a nuestra propia galaxia. Curtis, en cambio, defendía que debían estar muchísimo más lejos y constituir, por tanto, entidades independientes y tan grandes como la Vía Láctea. Poco después, los estudios de Leavitt sobre las cefeidas se revelaron clave para resolver esta disputa y convertir nuestro universo en uno poblado por innumerables galaxias.

Hoy en día asistimos a debates igual de intensos y fundamentales. Uno de ellos es el relacionado con la velocidad a la que se expande el universo actual, cuya solución podría conducir al descubrimiento de nueva física [*véase* «El problema de la constante de Hubble», por Dominik J. Schwarz; Investigación y Ciencia, marzo de 2019]. Otro surgió hace casi dos años con la publicación del artículo mencionado arriba, sugerentemente titulado «Una galaxia sin materia oscura».

Los autores de aquel trabajo, liderados por el investigador de Yale Pieter van Dokkum, comunicaban el descubrimiento de una galaxia enana (con un número de estrellas unas 300 veces menor que el de la Vía Láctea) cuya dinámica interna podía explicarse sin necesidad de suponer la existencia de materia oscura. De ser cierto, las consecuencias serían de primer orden, ya que uno de los cimientos de la teoría moderna de formación de galaxias es justamente la existencia de materia oscura. Sin esta materia invisible, no sabríamos explicar cómo pudo producirse la atracción gravitatoria suficiente para que el gas inicial que forma las estrellas se agrupase y diese lugar a las galaxias. Así pues, a raíz de dicha publicación comenzó una carrera frenética por entender la naturaleza de aquella enigmática galaxia.



La galaxia en cuestión, denominada KKS2000-04 y también conocida como NGC 1052-DF2, presentaba otra característica que la hacía aún más extraña. Sus cúmulos globulares (agrupaciones esféricas de estrellas que orbitan alrededor de casi todas las galaxias conocidas) eran anormalmente luminosos. Alertados por este hecho, mi grupo de investigación decidió explorar con detalle cuán lejos se encontraba realmente la galaxia. Si, por alguna razón, KKS2000-04 se hallase más cerca de lo que originalmente había supuesto el grupo de Yale, su dinámica interna no solo implicaría la existencia de materia oscura, sino que su población de cúmulos globulares sería también normal.

Brillo superficial

KKS2000-04 se encuentra demasiado lejos para aplicar el método de Leavitt, ya que resulta muy difícil resolver sus cefeidas de manera individual. Así pues, debemos recurrir a otros indicadores de distancia menos precisos pero que, a cambio, permiten examinar objetos más remotos. En este caso, la estimación original de la distancia a KKS2000-04 se había logrado mediante una técnica conocida como «fluctuaciones de brillo superficial».

Dicho método se basa en dividir la imagen de la galaxia en varias áreas, o «píxeles», y examinar las diferencias de brillo existentes entre ellas. En una galaxia relativamente cercana, cada píxel

contendrá pocas estrellas y, por pura estadística, algunos incluirán estrellas muy brillantes (las cuales son también muy escasas) y otros no. Como consecuencia, observaremos variaciones de brillo considerables entre los distintos píxeles de la imagen. Si, por el contrario, la galaxia se halla muy lejos, cada píxel abarcará un número enorme de estrellas, de manera que todos ellos presentarán un brillo similar. En otras palabras: cuanto mayor sean las diferencias de brillo entre los distintos píxeles, más cerca se encontrará el objeto. Con una calibración adecuada, este método permite estimar la distancia a la que se halla una galaxia.

Según esta técnica, el equipo de Van Dokkum encontró que KKS2000-04 se encontraba a unos 20 megapársecs (Mpc), equivalentes a unos 65 millones de años luz. Además, dicha distancia coincidía con la estimada para otra galaxia gigante que se hallaba en la misma línea de visión que KKS2000-04. Por tanto, esta última (una galaxia enana) podía entenderse como una galaxia satélite de la primera. Todo parecía encajar. No obstante, había un punto débil en el razonamiento del grupo de Yale.

La técnica de las fluctuaciones de brillo se había calibrado usando galaxias muy masivas, densas y con una población estelar rica en «metales» (término que, en astronomía, se refiere a todos los elementos más pesados que el helio). Sin embargo, KKS2000-04 es muy poco densa —casi podemos ver a través de ella— y sus estrellas son pobres en metales. Así pues, ¿podía aplicarse el método propuesto por Van Dokkum y sus colaboradores?

Por fortuna, muy poco después de la publicación del trabajo en *Nature*, apareció un artículo en el que otro grupo calibraba el método de las fluctuaciones de brillo con galaxias mucho más parecidas a KKS2000-04. Al aplicar esta nueva calibración, la distancia a la galaxia en disputa se reducía automáticamente hasta unos 15 Mpc; es decir, un 25 por ciento menos.

Indicadores adicionales

No contentos con este resultado, nuestro grupo decidió explorar otros indicadores de distancia. El método más robusto que encontramos fue el conocido como «brillo de la parte alta de la rama de gigantes rojas», también llamado TRGB por sus siglas en inglés. Este se basa en que las estrellas gigantes rojas, durante un corto período de tiempo denominado «fogonazo del helio», alcanzan un brillo máximo muy intenso cuya luminosidad en el infrarrojo es siempre la misma. Esta técnica se parece en espíritu a la de Leavitt, pero permite calcular distancias hasta unos 20 Mpc, siempre y cuando la resolución permita identificar gigantes rojas de manera individual.

Por fortuna, KKS2000-04 había sido observada con dicha resolución por el telescopio espacial Hubble. De inmediato nos pusimos manos a la obra y analizamos sus gigantes rojas. Aquello no fue tarea fácil, ya que los datos del Hubble se encontraban en el límite de resolución requerido. De hecho, esa fue una de las razones por las que el grupo de Yale no empleó este método. Sin embargo, y aunque los datos no fuesen los mejores, decidimos probar fortuna. Para nuestra sorpresa, encontramos que la distancia que arrojaba la nueva técnica era aún menor: 13 Mpc.

El debate sobre KKS2000-04 ilustra la dificultad que reviste calcular distancias en astronomía

Además, probamos con otros tres métodos independientes. Uno de ellos se basó en considerar una galaxia de propiedades y tamaño muy similares a los de KKS2000-04 pero mucho más cercana, por lo que su distancia se conocía con precisión. Al simular cómo se vería esta galaxia a varias distancias, pudimos comprobar que la mejor coincidencia con el aspecto de KKS2000-04 se daba a justamente a 13 Mpc, descartando con una probabilidad del 99,7 por ciento que se hallase a 20 Mpc. Por último, usamos dos propiedades de los cúmulos globulares que son tremendamente estables e independientes de las galaxias que los albergan: la luminosidad y el tamaño medio de estas agrupaciones estelares. De nuevo, dichos indicadores volvían a arrojar una distancia próxima a los 13 Mpc.

Con este valor, las propiedades de KKS2000-04 son las habituales: la dinámica de la galaxia resulta compatible con la existencia de materia oscura y sus cúmulos globulares exhiben las propiedades esperadas.

Observaciones en curso

En estos momentos el debate continúa abierto. A principios de 2019, el grupo de Yale encontró en el mismo grupo de objetos otra galaxia cuya dinámica era todavía más extrema que la de KKS2000-04: sus cúmulos estelares se movían tan despacio que ni siquiera la materia visible podía explicar con facilidad su dinámica. Para esta galaxia, los autores proponen asimismo una distancia de unos 20 Mpc, si bien usan la misma técnica de fluctuaciones de brillo superficial que hemos criticado.

En un trabajo publicado el pasado mes de julio, hemos vuelto a usar la técnica de las gigantes rojas para estimar la distancia a esta nueva galaxia. Una vez más, nuestro análisis arroja un resultado mucho menor: unos 14 Mpc.

Con todo, la ciencia se alimenta de la aportación constante de datos, por lo que ya hay en camino nuevas observaciones, tanto del telescopio espacial Hubble como de otros instrumentos terrestres. Quizá para cuando usted lea estas líneas ya sepamos con seguridad si estas galaxias carecen verdaderamente de materia oscura o si, por el contrario, no son más que pequeñas galaxias ordinarias y más cercanas. Como ocurre casi siempre, el tiempo tendrá la última palabra.

—***Ignacio Trujillo Cabrera***
Instituto de Astrofísica de Canarias

PARA SABER MÁS

A galaxy lacking dark matter. Pieter van Dokkum et al. en *Nature*, vol. 555, págs. 629-632, marzo de 2019.
A second galaxy missing dark matter in the NGC 1052 group. Pieter van Dokkum et al. en *The Astrophysical Journal Letters*, vol. 874, art. L5, marzo de 2019.
A distance of 13 Mpc resolves the claimed anomalies of the galaxy lacking dark matter. Ignacio Trujillo et al. en *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, vol. 486, págs. 1192–1219, junio de 2019.
The TRGB distance to the second galaxy "missing dark matter": Evidence for two groups of galaxies at 13.5 and 19 Mpc in the line of sight of NGC 1052. Matteo Monelli e Ignacio Trujillo en *The Astrophysical Journal Letters*, vol. 880, art. L11, julio de 2019.

EN NUESTRO ARCHIVO

Galaxias enanas y materia oscura. Pavel Kroupa y Marcel Pawlowski en *IyC*, marzo de 2011.
¿Es real la materia oscura? Sabine Hossenfelder y Stacy S. McGaugh en *IyC*, octubre de 2018.

INNOVACIÓN TECNOLÓGICA

SENSAI ABSOLUTE SILK Micro Mousse Treatment

La seda se une a la ciencia con el nuevo tratamiento de SENSAI. Absolute Silk Micro Mousse Treatment combina la seda más pura de Japón en su versión más novedosa, **Koishimaru Silk Royal™**, con una innovadora tecnología de Microburbujas de ácido carbónico puro al 100%.

Un tratamiento clave para asegurar el bienestar de la piel y frenar los signos del envejecimiento.



¿Dónde comenzó la Ciencia de la Microburbuja?

Las aguas termales han sido populares durante mucho tiempo como un medio de tratamiento curativo y de belleza mediante su uso en balnearios con aguas carbonatadas.

Desde los años 80, los Laboratorios Kao han llevado a cabo investigaciones para desarrollar productos centrados en el efecto del dióxido de carbono para mejorar el flujo sanguíneo y ofrecer una piel con un aspecto más saludable. En 2007, se lanzaron cosméticos para el cuidado de la piel con ácido carbónico. Este año, de la mano de SENSAI, nace la primera mousse con micro burbujas carbonatadas: SENSAI ABSOLUTE SILK MICRO MOUSSE TREATMENT.

Concepto tecnológico: Micro Mousse

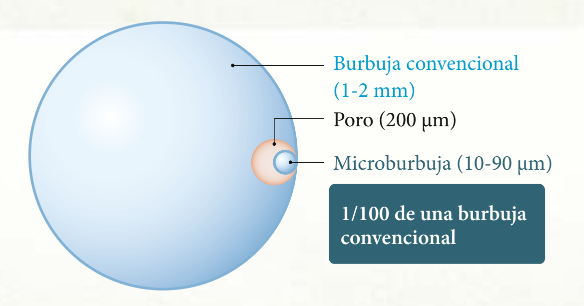
Cuando esta mousse se aplica sobre la piel produce un efecto tangible, aunque no puedan observarse las microburbujas a simple vista ya que la fórmula de la mousse las protege, impidiendo que puedan mostrarse al exterior.

Esta micro mousse está especialmente diseñada para mantener alta la concentración de dióxido de carbono en la formulación. A continuación explicaremos su composición.

Como se puede apreciar en la ilustración I, las microburbujas tienen un diámetro aproximado de 50 µm (micras) y un tamaño 8.000 veces menor en volumen que las burbujas del agua con gas. Son microburbujas con un tamaño de partícula de tan solo decenas de micrómetros, por lo que resultan invisibles, y son más pequeñas

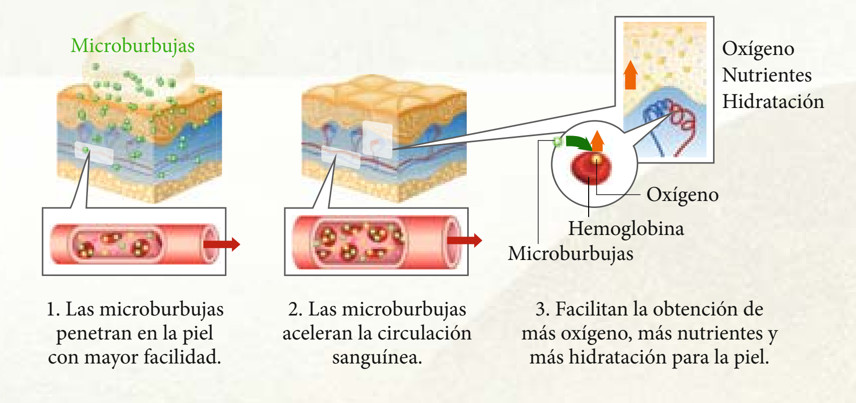
I. ¿Por qué lo llamamos «Micro»?

Las microburbujas son más pequeñas que los poros para penetrar en la piel



III. Efecto Microburbujas

¡Invisibles pero con resultados visibles!



II. La exclusiva tecnología SENSAI

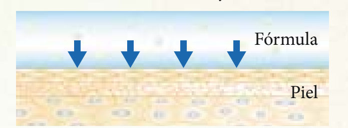
La fórmula Microburbujas consigue una alta penetración en la piel

Burbujas convencionales



Las burbujas se evaporan…

Microburbujas



Las microburbujas permanecen en alta concentración.

que los poros. Esta es la clave, ya que este tamaño tan reducido es lo que permite que puedan penetrar en la piel a través de los poros.

En el caso de otras fórmulas carbonatadas convencionales, se libera rápidamente al aire el dióxido de carbono que contienen, perdiendo su efecto. Con SENSAI ABSOLUTE SILK, gracias a la micro mousse, las microburbujas sí pueden evitar la liberación del dióxido de carbono de la formulación. Esta protección extra hace posible mantener excepcionalmente alta la concentración de ácido carbónico.

La preparación con microburbujas de SENSAI ABSOLUTE SILK con alta concentración de dióxido de carbono se mantiene en la piel y consigue provocar un flujo sanguíneo más alto. Incluso a simple vista se puede ver la piel más enrojecida gracias a este aporte.

La exclusiva tecnología de SENSAI

Incluso si las otras fórmulas contuviesen ácido carbónico en su preparación, este se escaparía, como ocurre en el caso de un agua con gas, y se perdería fácilmente en el aire.

Con las microburbujas logramos confinar el ácido carbónico manteniendo alta su concentración sin dejar que escape, consiguiendo así que pueda penetrar profundamente en la piel con nuestra exclusiva tecnología de micro mousse. Para comprobar este hecho, medimos los cambios en la concentración obtenidos a lo largo del tiempo con el agua carbonatada normal y con la microespuma carbonatada.

El resultado de estas mediciones se puede ver en la *figura A*, donde la concentración de ácido carbónico se mantiene alta durante mucho más tiempo gracias a la fórmula del tratamiento Micro Mousse de SENSAI.

En la *figura B* se compara la cantidad de CO_2 que ha penetrado en la piel 10 minutos después de la aplicación de cada fórmula. La micro mousse mantiene una alta concentración de ácido carbónico durante mucho más tiempo, de modo que la penetración en la piel es mucho mayor que la del agua carbonatada.

Justo después de aplicar la preparación de ácido carbónico en la piel, se puede ver que los glóbulos rojos fluyen vigorosamente en muchos capilares debido a la acción del ácido carbónico de la fórmula.

Esta acción de mejora del flujo sanguíneo se produce porque los vasos sanguíneos se dilatan cuando el dióxido de carbono es absorbido por la piel. Cuando se aumenta el flujo sanguíneo, se suministra oxígeno, nutrientes y agua desde los capilares en la superficie de la piel, tal y como se muestra en la *figura C*, de modo que se mejora el metabolismo de la piel, se suaviza su entorno y esto contribuye al efecto de una piel más hermosa.

Esta figura se llama «curva de disociación de oxígeno» y muestra la cantidad de oxígeno que sale de la hemoglobina bajo ciertas condiciones. Si el dióxido de carbono es abundante, la curva se moverá hacia la derecha, permitiendo que se libere más oxígeno. Este es el «efecto Bohr».

Con la exclusiva seda japonesa, la Koishimaru Silk Royal ™

SENSAI presenta su gran novedad tecnológica de micro mousse. SENSAI es una marca que ofrece una experiencia que va más allá del mundo del cuidado de la piel. En cada aplicación se despiertan impresiones sensoriales, que imitan las destacables cualidades de la Seda Koishimaru.

Para experimentar la Seda Koishimaru es importante la apariencia de la mousse y el aspecto final del cutis después de su aplicación.

La mousse es sedosa, con un aspecto esponjoso y delicado. Para conseguir una mousse normal se usaba un gas licuado para hacer que la textura fuera cremosa, pero la nueva formulación en aerosol de dióxido de carbono no producía esa textura. Como resultado de la experimentación con muchos tensioactivos, se pudo encontrar el diseño óptimo que hiciera llegar la burbuja carbonatada de alta concentración directamente al cutis, y que se pudiera extender fácilmente sobre la piel.

Tras repetidas pruebas y ensayos de laboratorio, combinando gran diversidad de aceites y polioles, finalmente se eligió el aceite de éster, que suaviza la piel, formando un velo humectante, muy suave y ligero, que consigue una piel más firme y luminosa. Por último, con una combinación de diglicerina se consiguió mejorar el aspecto de piel radiante.

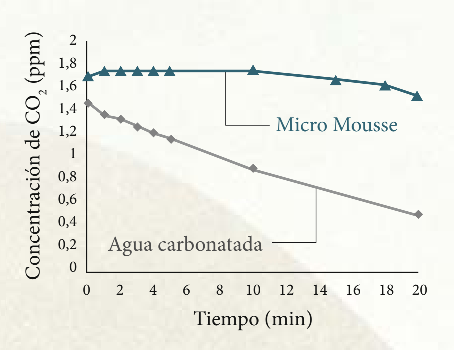
En una encuesta de uso realizada en Europa, el 90 % de las personas afirmó sentir cambios en el aspecto de la piel: más radiante y luminosa.

Con el uso continuado de la fórmula de ácido carbónico, se consigue un efecto antienvejecimiento y de mejora en la piel. Tras 4 semanas, las irregularidades y las líneas finas en su superficie mejoran notoriamente. Se contrarrestan así los signos del envejecimiento para obtener una piel rejuvenecida, más suave y radiante.

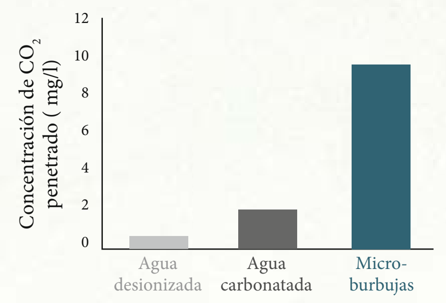
Estos son los resultados de aplicar este tratamiento antienvejecimiento con la tecnología de última generación de microburbujas **SENSAI ABSOLUTE SILK MICRO MOUSSE TREATMENT.** ■



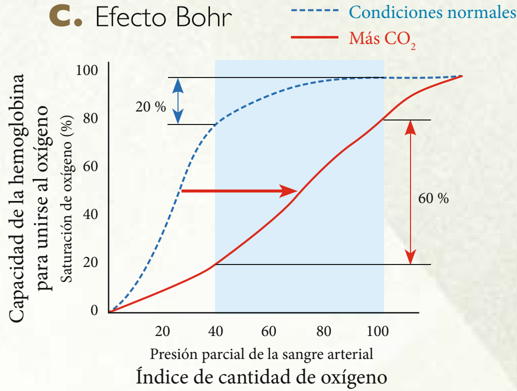
A. Concentración de CO_2

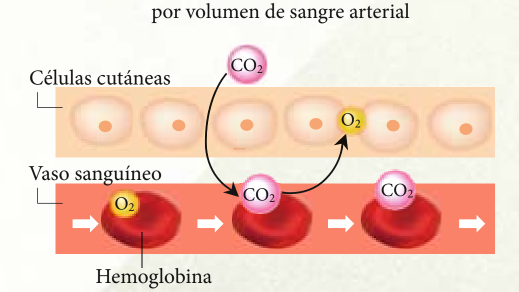


B. Comparación de penetración de CO_2



C. Efecto Bohr





SENSAI

THE SENSE AND SCIENCE OF **JAPAN**





MONSTRUOS DE LOS CIELOS MESOZOICOS



Los fósiles y los modelos matemáticos nos están ayudando a responder antiguas preguntas sobre los pterosaurios

Michael B. Habib

Ilustración de Chase Stone

Michael B. Habib es paleontólogo y biomecánico de la Universidad del Sur de California. Estudia la anatomía y el movimiento de los pterosaurios, de aves y de dinosaurios con plumas.



El Mesozoico, el período comprendido entre hace 251 y 66 millones de años, se conoce a menudo como la era de los dinosaurios. Pero, aunque estos reinaban en el medio terrestre, no conquistaron el cielo, que era dominado por un grupo muy distinto de animales: los pterosaurios.

Los pterosaurios fueron los primeros vertebrados que desarrollaron la capacidad de volar, gracias a la cual se adueñaron del cielo mucho antes de que lo hicieran las aves. Vivieron durante más de 160 millones de años, antes de desaparecer junto a los dinosauros no avianos al final del período Cretácico, hará unos 66 millones de años. En ese espacio de tiempo, desarrollaron algunas de las adaptaciones anatómicas más extremas que haya poseído ningún animal, vivo o extinto. El más pequeño de estos depredadores aéreos tenía el tamaño de un gorrión, y el más grande, una envergadura que competiría con la de un avión de caza F-16. La cabeza de muchos de ellos era mayor que su cuerpo, lo que los convertía, básicamente, en mandíbulas voladoras asesinas. Los pterosaurios merodeaban sobre cada océano y continente de la Tierra. Ningún animal del Mesozoico se escapaba de su vigilancia.

A diferencia de los dinosaurios, cuyos descendientes, las aves, siguen vivas en la actualidad, los pterosaurios no dejaron descendientes vivos. Por este motivo, todo lo que los paleontólogos sabemos de ellos procede del registro fósil. Resulta muy frustrante que ese registro sea incompleto, porque apenas nos ha permitido vislumbrar su gloria pasada y ha generado muchas preguntas durante décadas. Ahora, recientes hallazgos fósiles combinados con métodos de modelización matemática nos están proporcionando, por fin, nueva información. En los modelos, las estructuras anatómicas se han simplificado de tal manera que las ecuaciones de las propiedades físicas pueden aplicarse para obtener mejores estimaciones de la fuerza, el peso o la velocidad. Y lo que estamos descubriendo es que los pterosaurios fueron incluso más extraordinarios de lo que nunca habíamos imaginado.

LEVIATANES ALADOS

Uno de los misterios más duraderos sobre los pterosaurios era cómo lograban volar las especies de mayor tamaño. Gigantes como *Quetzalcoatlus*, descubierto por primera vez en Texas, y *Hatzegopteryx*, en la actual Rumania, eran tan altos como una jirafa y su envergadura alcanzaba casi los diez metros. Las mandíbulas de estos animales doblaban en longitud a las de *Tyrannosaurus rex*. Sus extremidades superiores eran casi tan gruesas como el torso de un humano adulto. Esos monstruos superaban los 300 kilogramos de peso. A modo de comparación, las aves más grandes capaces de volar (*Argentavis*, que vivió hace seis millones de años en Argentina) pesaba unos 75 kilogramos.

Las diferencias entre los representantes de mayor tamaño de cada uno de estos grupos son tan notables que, de hecho, muchos investigadores han sugerido que los pterosaurios más grandes no podrían volar —lo que resultaría desconcertante, dadas sus múltiples adaptaciones anatómicas para el vuelo—. Otros han propuesto que sí podrían volar, pero solo bajo ciertas condiciones del aire y de la superficie (por ejemplo, que la atmósfera de la época fuera más densa que la actual). Aun así, parece incomprensible que aves tan enormes tuvieran la capacidad de volar. De hecho, estudios recientes sobre potencia a diferentes escalas realizados por diversos investigadores, entre los que me incluyo, han demostrado que las aves de gran tamaño no tendrían, para empezar, la potencia necesaria para despegar por sí mismas.

Pero los pterosaurios no eran aves. De hecho, durante la última década nuestro equipo ha realizado numerosos cálculos sobre la potencia necesaria para el despegue y el vuelo de estos animales. Y hemos demostrado que los más grandes podían despegar y volar, y que probablemente no necesitaban circunstancias especiales para lograrlo. En línea con estas conclusiones, los análisis geoquímicos de rocas sedimentarias y los estudios microanatómicos de fósiles vegetales indican que las condiciones del aire y de la superficie en el Cretácico tardío, cuando los enormes pterosaurios estaban en su apogeo, no eran muy diferentes de las actuales. Lo que era diferente, y singular, era su anatomía.

Un animal de tamaño gigantesco ha de cumplir tres requisitos para poder volar. Primero, su esqueleto debe presentar una fortaleza muy alta con respecto al peso, lo que se traduce en un gran volumen pero una baja densidad. Los pterosaurios y las aves poseen un esqueleto así: muchos de sus huesos están bastante huecos. Las paredes del húmero de *Quetzalcoatlus* medían unos 3 milímetros de espesor (más o menos como la cáscara de un huevo de avestruz), a pesar de que el diámetro del hueso superaba los 26 centímetros en el codo.

EN SÍNTESIS

Los pterosaurios fueron los primeros vertebrados que desarrollaron el vuelo activo, casi 80 millones de años antes que las aves.

Durante su largo reinado, desarrollaron algunas de las adaptaciones más extremas del reino animal.

Nuevos fósiles y modelos matemáticos nos están permitiendo conocer por fin cómo vivieron y por qué se extinguieron, y dejaron así a las aves el dominio de los cielos.

En segundo lugar, su coeficiente máximo de sustentación debe ser elevado. Esta magnitud describe cuánta sustentación producen las alas para una velocidad y una superficie alar dadas. Con un coeficiente alto un animal puede ser más pesado, porque sus alas soportarán más peso a una velocidad menor. Esta relación, a su vez, significa que necesitará menos velocidad para despegar, lo que marca una gran diferencia en la potencia muscular necesaria para alzar el vuelo. Las alas membranosas, como las de los pterosaurios y los murciélagos, producen más sustentación por unidad de velocidad y superficie que las alas con plumas de las aves. Esta sustentación adicional mejora la capacidad de maniobra a poca velocidad, algo que ayuda a los animales pequeños a realizar giros más cerrados, y a los grandes, a despegar y aterrizar.

El tercer y más importante requisito es la potencia de despegue. Incluso si posee alas grandes y muy eficientes, un volador de gran tamaño todavía necesita mucha potencia de salto para alzar el vuelo. Los animales voladores no lo consiguen aleteando o utilizando la gravedad para despegar desde una posición elevada, como un acantilado. Las alas no producen tanta sustentación a poca velocidad, y lanzarse en favor de la gravedad significaría intentar despegar en la dirección errónea, una perspectiva peligrosa. En cambio, un salto potente proporciona la velocidad y la altura críticas para empezar a volar. Una mayor potencia de salto ofrece una mejor potencia de despegue. Por lo tanto, los grandes voladores necesitan ser buenos saltadores.

Muchas aves logran dar saltos impresionantes. Sin embargo, están limitadas por su herencia como dinosaurios terópodos: al igual que sus antepasados, todas las aves son bípedas, lo que significa que solo poseen extremidades posteriores con las que impulsarse para saltar. Los pterosaurios, por el contrario, eran cuadrúpedos cuando estaban en el suelo. Sus alas se doblaban y servían como extremidades para caminar y, por tanto, también para saltar. Existen numerosas huellas fósiles perfectamente conservadas que confirman este extraño aspecto de la anatomía de los pterosaurios. El hecho de ser cuadrúpedo cambia por completo el tamaño máximo que puede poseer un animal volador. Para despegar, además de las extremidades posteriores, los pterosaurios podían utilizar las anteriores, mucho más voluminosas, con lo que superaban en más del doble la potencia disponible para despegar. Poseían la combinación perfecta de adaptaciones para convertirse en gigantes voladores.

Estudios previos habían creado modelos sobre los despegues bípedos para los pterosaurios gigantes. En 2004, Sankar Chatterjee, de la Universidad Tecnológica de Texas, y sus colaboradores averiguaron cómo podía propulsarse *Quetzalcoatlus* para despegar únicamente con las extremidades posteriores. Pero llegaron a la conclusión de que, según ese planteamiento, el animal no pesaría más de 75 kilogramos y se vería obligado a correr ladera abajo con el viento en contra. El despegue sobre cuatro extremidades posibilita un peso corporal más realista y unas condiciones ambientales menos restrictivas.

CABEZAS PESADAS

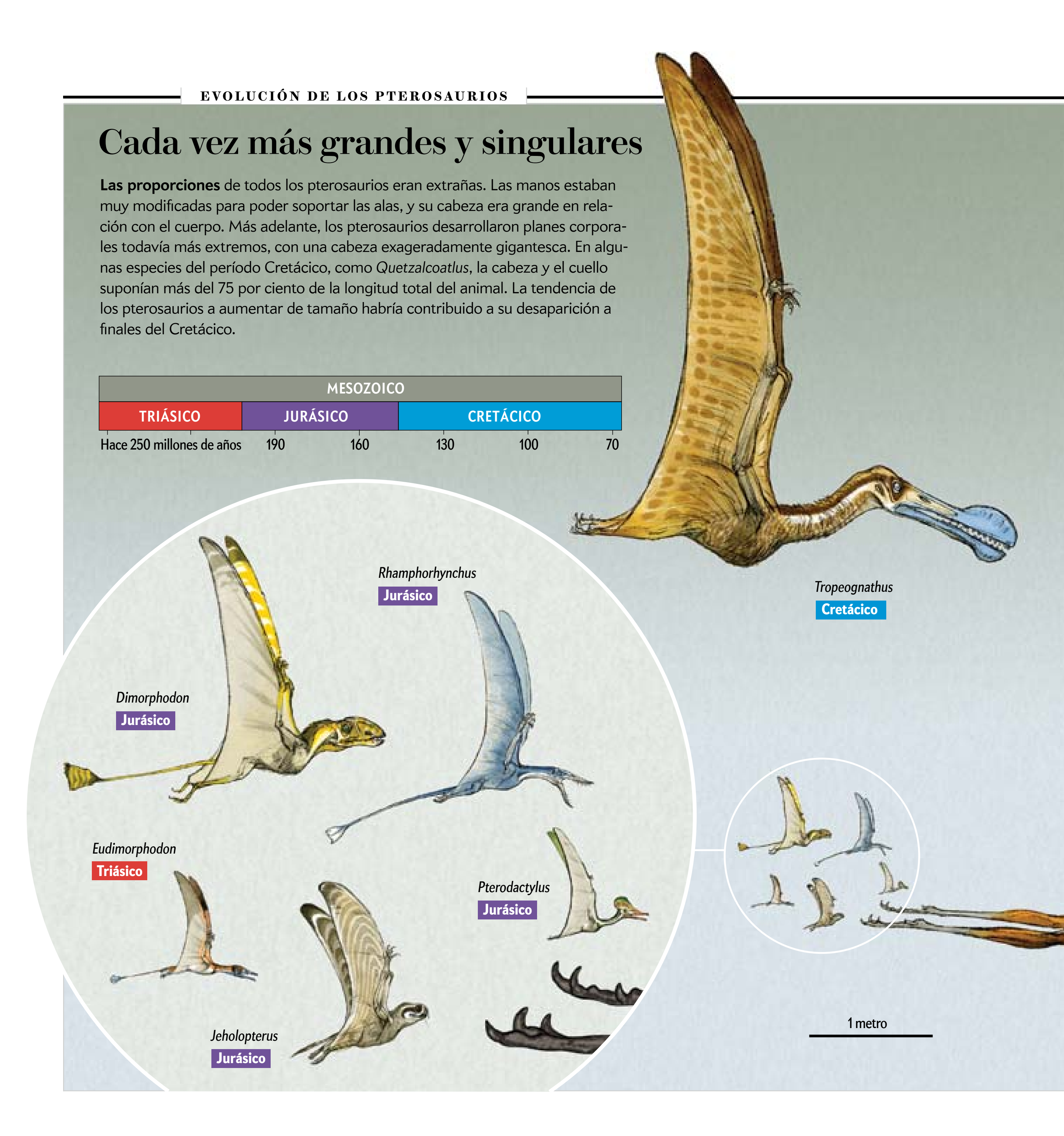
Aunque llegue a resolverse el gran misterio acerca del tamaño global de los pterosaurios, las medidas relativas de las diferentes partes del cuerpo siguen desconcertando a los investigadores. Las proporciones son realmente curiosas. Todos los pterosaurios tenían elementos singulares en las extremidades. Las manos, por ejemplo, son, posiblemente, las más especializadas de todo el mundo vertebrado, con un cuarto dedo enorme que soportaba el ala. Sin embargo, este dato no resulta demasiado sorprendente de por sí, porque esa mano inusual era intrínseca al ala del pterosaurio y a su capacidad para volar. Lo que de verdad confunde a los científicos y a los entusiastas de estos animales no son las alas de los pterosaurios, sino la cabeza.

Los primeros pterosaurios ya contaban con una cabeza voluminosa. La de *Rhamphorhynchus*, una especie representativa de hace 150 millones de años, del Jurásico tardío, era casi tan grande como su cuerpo. Más tarde, en el Cretácico, la cabeza aún creció más. Los fósiles de *Quetzalcoatlus*, así como de *Anhanguera*, de Brasil, muestran que los pterosaurios aumentaron de tamaño en promedio, pero su cabeza se volvió gigantesca. El cráneo de un pterosaurio típico del Cretácico podía ser dos o incluso tres veces más largo que su cuerpo (medido este por regla general como la distancia entre el hombro y la cadera). El cráneo de algunas especies era más de cuatro veces más largo que su cuerpo. No obstante, la cavidad craneana no era tan enorme. Fueron el rostro y las mandíbulas las que se expandieron en grado sumo. Los rebordes óseos situados bajo la mandíbula, las imponentes crestas en la parte superior del cráneo y otras características muy elaboradas exageraban aún más la anatomía del cráneo del pterosaurio. En conjunto, parecía que la cabeza pertenecía a un animal distinto al que sugería el cuerpo.

Las rarezas no acaban ahí. Mientras que en la mayoría de los animales, incluidos los humanos, las vértebras cervicales son de las más pequeñas de la columna, las de los pterosaurios son a menudo las más grandes. De hecho, suelen tener el doble de tamaño que las del torso. Una de las incorporaciones más nuevas al árbol familiar de los pterosaurios ofrece un buen ejemplo de esa tendencia. Hace poco, David Hone, de la Universidad Queen Mary de Londres; François Therrien, del Museo Real Tyrrell, en Alberta; y yo mismo hemos descrito en el *Journal of Vertebrate Paleontology* los fósiles de una nueva especie descubierta en Alberta. La hemos denominado *Cryodrakon boreas*, que significa «dragón helado del norte», en referencia al lugar donde la encontramos, pero también al dragón Viserion, de *Juego de tronos*. Las vértebras cervicales son casi tan largas y el doble de fuertes que las del húmero, el hueso del ala al que se unen la mayoría de los músculos utilizados para volar y el que más esfuerzo realiza para mantener al animal en el aire. En algunas especies, el cuello mide el triple que el torso, siendo también triple el tamaño de la cabeza, lo que hace que esta y el cuello supongan más del 75 por ciento de la longitud total del pterosaurio. ¿Por qué un animal tendría unas proporciones tan extrañas? ¿Y cómo podría semejante plan corporal ofrecer la posibilidad de volar?

Los especialistas siguen investigando por qué los pterosaurios adquirieron una anatomía tan curiosa. Una posible explicación es la hipótesis a la que llamo «si fuera fácil todo el mundo lo haría». En pocas palabras, tener unas mandíbulas enormes para comer y un rostro grande con el que enviar señales a parejas y rivales puede ser una gran opción para numerosos animales si los costes asociados a estos rasgos no fueran, por norma general, prohibitivos. Por ejemplo, los mamíferos presentan una gran cavidad craneana, por lo que su cabeza pesa más cuanto mayores son todas sus dimensiones. La evolución de los pterosaurios podría haber llegado a un punto en el que las proporciones del rostro concordaran menos con las de la parte posterior del cráneo. Eso les habría permitido desarrollar unas mandíbulas gigantes sin la necesidad de tener una gran capacidad craneana.

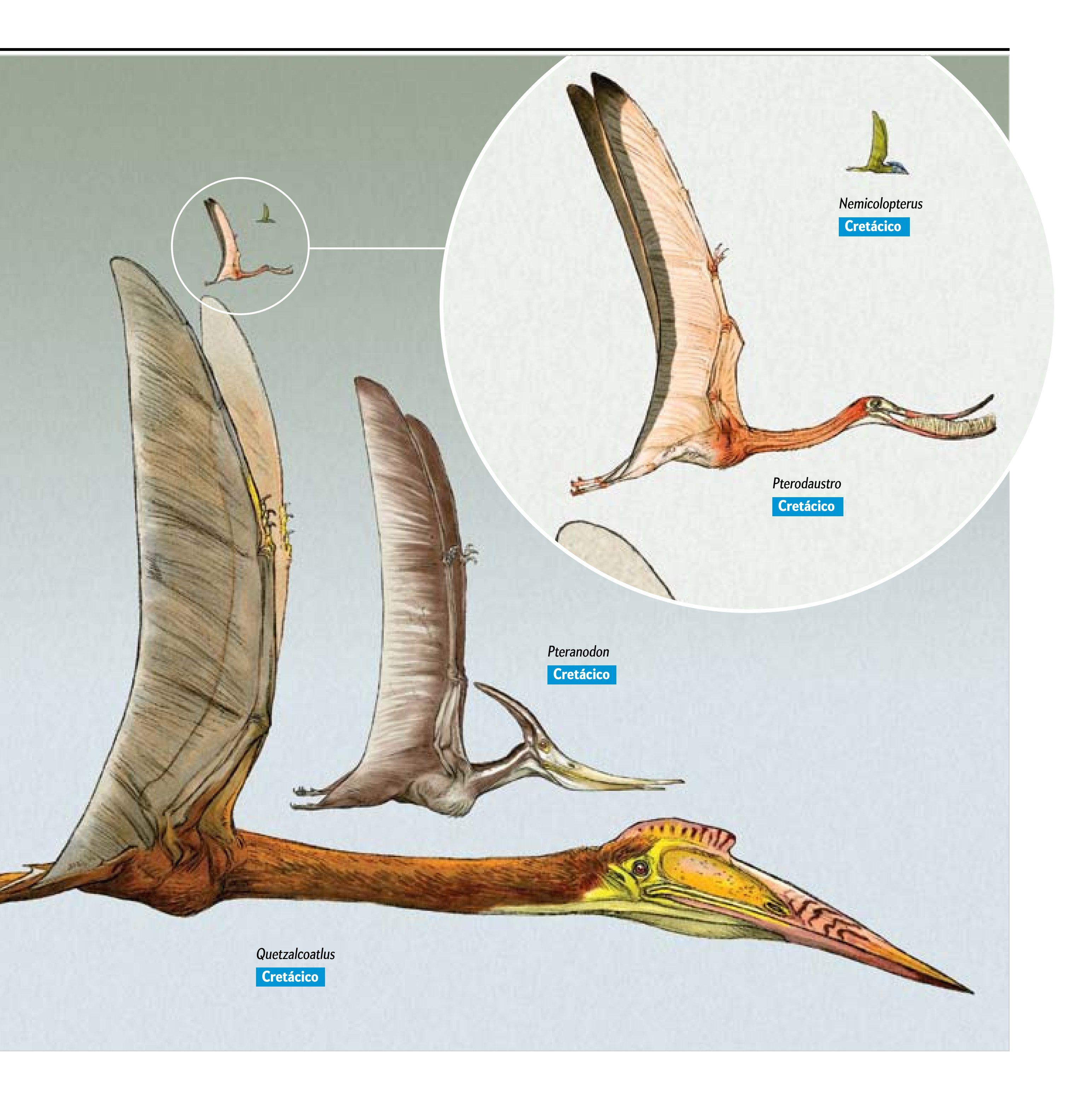
Los pterosaurios también exhibían más aberturas en el cráneo. La más grande de ellas, denominada fosa o fenestra anteorbital, se hallaba delante de los ojos. Los dinosaurios también



FUENTE: FLYING MONSTERS, DESIGN STUDIO PRESS
TERRYL WHITLATCH (*ilustración*)

tenían esa abertura, pero en los pterosaurios se desarrolló más. En algunos casos alcanzó tal amplitud que todo el esqueleto del torso podría haber cabido en ella. La fosa estaría cubierta con piel y otros tejidos, por lo que no habría resultado visible; pero eso reduciría el peso del cráneo, en comparación con su volumen. Los huesos craneanos, igual que los de algunas aves actuales, contendrían grandes espacios de aire.

Sin embargo, incluso con estas características que ahorraban peso, la cabeza de los pterosaurios resultaba tan colosal que seguía siendo muy pesada. Pero, aunque parezca contradictorio, puede que el hecho de ser animales voladores les hubiera favorecido en este sentido. El principal problema de tener una cabeza pesada no es el incremento general del peso corporal. Más bien es el efecto desproporcionado que el peso del cráneo tiene sobre el centro de gravedad del animal. Una cabeza enorme, sobre todo si se sitúa sobre un cuello igualmente enorme, hace desplazar el centro de gravedad hacia delante. En un animal pedestre, ello supondría un serio problema a la hora de caminar: las extremidades anteriores tendrían que colocarse en una posición adelantada incómoda para poder mantener el equilibrio. Pero los pterosaurios tenían extremidades anteriores enormes, desarrolladas para poder volar.

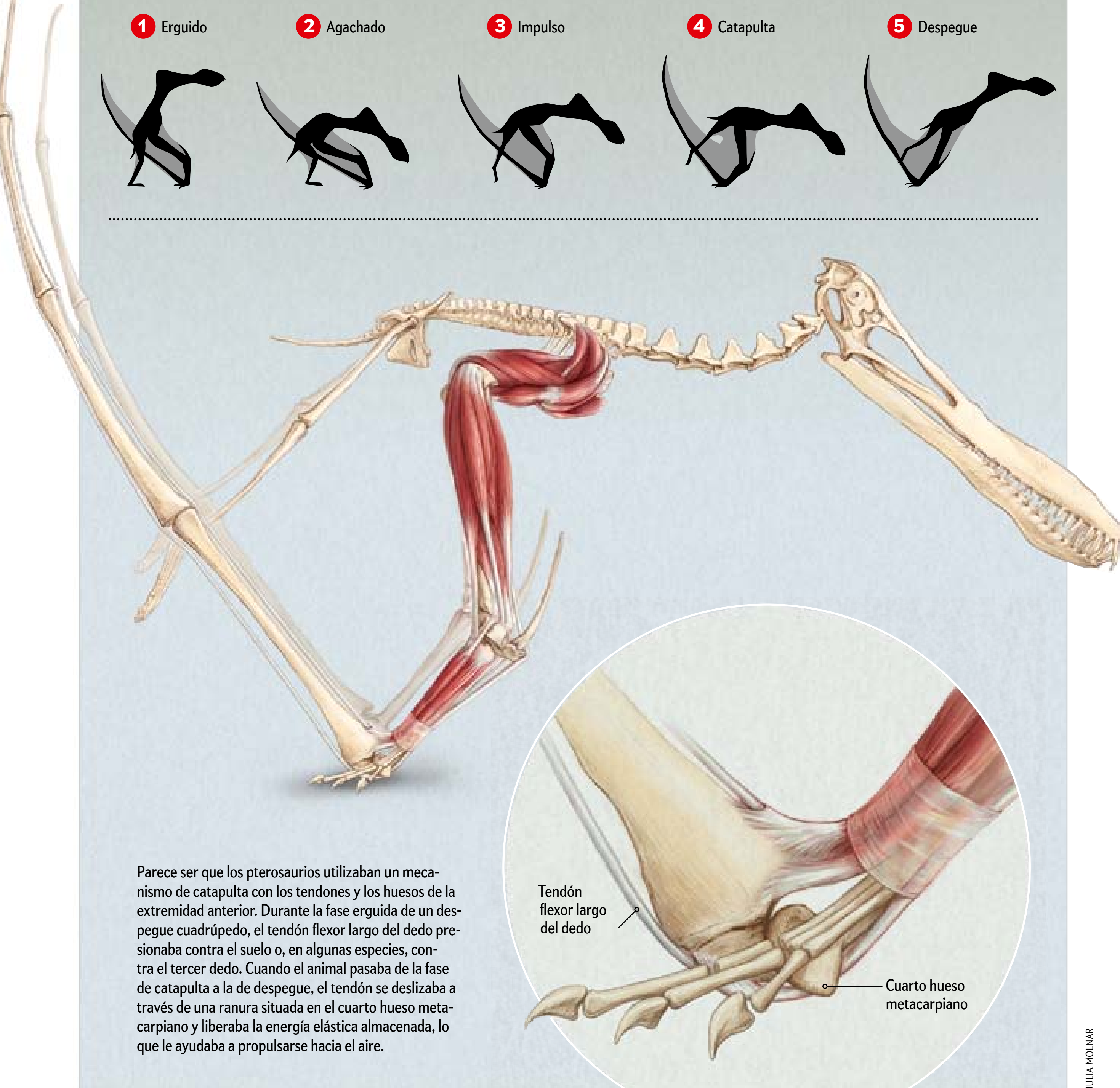


Kevin Padian, de la Universidad de California en Berkeley, ha reconstruido el andar de esos gigantes. Cuando caminaban, las extremidades anteriores estaban posicionadas de tal manera que soportaban el peso de la cabeza, el cuello y el torso. La mayor parte de la propulsión durante la marcha procedía de las patas traseras. Sostenían la enorme cabeza sobre las corpulentas extremidades anteriores y se empujaban a sí mismos con las posteriores, de tamaño mucho más normal. Imaginemos que utilizamos muletas para caminar y minimizar el peso que soportan las piernas: primero, avanzaríamos las muletas a la vez y dejaríamos que aguantaran todo nuestro peso; luego balancearíamos las piernas hacia delante y las colocaríamos entre las muletas, sobre el suelo, para después repetir toda la acción. Así parecería el andar de los pterosaurios. (Durante el despegue, primero empujarían las extremidades posteriores y después las anteriores, para un impulso perfecto compuesto de dos fases.)

Con esta disposición no se conseguía la marcha más eficiente, pero sí una que era factible. Y, de todas formas, los pterosaurios se desplazaban casi siempre volando. Las especies con alas especialmente largas y estrechas, como las de las aves marinas modernas, debían de volar durante meses o incluso años, ate-

El vuelo de un gigante

Los pterosaurios más grandes poseían adaptaciones evidentes para volar, pero seguramente pesaban más de 270 kilogramos, mucho más que el ave voladora más grande conocida. ¿Cómo lograban volar esos monstruos? A diferencia de las aves, que caminan y saltan para alzar el vuelo utilizando solo sus dos extremidades posteriores, los pterosaurios caminaban sobre las cuatro, algo que han demostrado las huellas fósiles. Los modelos matemáticos indican que alzar el vuelo desde una posición cuadrúpeda (impulsándose primero con las extremidades posteriores y luego con las anteriores) habría proporcionado la energía de salto suficiente para que estos pterosaurios gigantes pudiesen despegar. A diferencia del despegue bípedo, el cuadrúpedo habría aprovechado los poderosos músculos utilizados para el vuelo y un mecanismo de catapulta con la extremidad anterior.



Parece ser que los pterosaurios utilizaban un mecanismo de catapulta con los tendones y los huesos de la extremidad anterior. Durante la fase erguida de un despegue cuadrúpedo, el tendón flexor largo del dedo presionaba contra el suelo o, en algunas especies, contra el tercer dedo. Cuando el animal pasaba de la fase de catapulta a la de despegue, el tendón se deslizaba a través de una ranura situada en el cuarto hueso metacarpiano y liberaba la energía elástica almacenada, lo que le ayudaba a propulsarse hacia el aire.

JULIA MOLNAR

rrizando solo para aparearse o depositar sus huevos. Puede que el pterosaurio *Nyctosaurus* fuera el que tuviera las alas más eficientes (y, por ello, el vuelo continuo más largo) que haya tenido jamás un animal vertebrado.

En el aire, es mucho más fácil lidiar con el problema del centro de gravedad. Para que un animal se mantenga estable en él, su centro de sustentación y su centro de gravedad deben estar alineados. Ello parecería difícil de conseguir en una criatura dotada de una gran cabeza y de un centro de gravedad adelantado en consecuencia. Pero el centro de sustentación de un pterosaurio estaba cerca de la parte frontal de las alas, lo que significa que el animal solo necesitaba dirigirlas moderadamente hacia delante desde la base para alinear el centro de sustentación con el de gravedad, tal como Colin Palmer, de la Universidad de Bristol, y sus colaboradores señalaron por primera vez. El hecho de desplazar las alas hacia delante puede ser, en sí mismo, una fuente de inestabilidad, pero la flexibilidad de las alas del pterosaurio y los rápidos reflejos del cerebelo que poseen todos los vertebrados podrían haberlo compensado.

Dejando de lado los cambios en la estabilidad, las alas orientadas hacia delante pueden proporcionar interesantes beneficios. Uno de ellos es que sus puntas tienden a ser la última parte del ala en detenerse. Durante una parada, que suele producirse a poca velocidad, el ala pierde repentinamente una gran parte de la sustentación. La parada de la punta es especialmente catastrófica porque interrumpe de inmediato la estela del ala, lo que compromete en gran medida el empuje y el control e incrementa bruscamente la resistencia. La habilidad para retrasar esa pérdida de sustentación permite un aterrizaje y un despegue mucho más suaves, un aspecto importante para los animales grandes. En este sentido, una cabeza enorme puede ser una ventaja para un gigante volador con alas flexibles: el centro de gravedad se desplaza hacia delante y ello hace adelantar el ala, con lo cual será más difícil detenerla; como consecuencia, el animal puede volar más lentamente y volverse aún más grande.

EL FINAL DE UNA DINASTÍA

Durante unos 80 millones de años, los pterosaurios fueron los únicos vertebrados que podían volar. Luego, hará unos 150 millones de años, en el Jurásico, un segundo grupo de vertebrados empezó a alzar el vuelo: los dinosaurios con plumas. En este grupo se incluían criaturas con cuatro alas, como *Microraptor* y *Anchiornis*, al igual que los voladores más consumados, las aves. En el Cretácico temprano, una amplia variedad de aves compartía los cielos con los pterosaurios. A pesar de esa reorganización del nicho aéreo, los pterosaurios continuaron dominando entre los voladores de tamaño medio y grande, especialmente en los hábitats abiertos. Las aves quedaron sobre todo restringidas a zonas con vegetación, donde su cuerpo pequeño y agilidad suponían una gran ventaja. Los pterosaurios continuaron manteniendo así la supremacía en el cielo abierto.

Pero cuando, hace 66 millones de años, un asteroide chocó contra la Tierra y mató a todos los dinosaurios no avianos, el reinado de los pterosaurios también llegó a su fin. Descubrimientos paleontológicos indican que ni una sola especie del grupo sobrevivió más allá del Cretácico. Todos perecieron, al igual que la mayoría de las aves. Solo un linaje, el de las neornites, o aves modernas, logró persistir. Sin embargo, ese único linaje fue suficiente. Dio lugar a miles y miles de especies nuevas. En la actualidad, las neornites representan el segundo grupo más grande de vertebrados, detrás tan solo de los peces óseos, con más de 12.000 especies conocidas.

¿Por qué al final del Cretácico los pterosaurios sufrieron un destino peor que el de las aves? Una razón podría ser su tendencia a aumentar de tamaño. Casi ningún animal terrestre con una masa corporal adulta de más de 20 kilogramos sobrevivió a ese suceso apocalíptico. Y el hecho de ser voluminoso, y además volador, debió de suponer un coste excesivo, porque los grandes voladores tienden a confiar en el planeo dinámico durante buena parte de su desplazamiento. Para planear se necesitan unas condiciones meteorológicas apropiadas. El choque del asteroide provocó que parte de la corteza terrestre se vaporizara, además de una gran parte de él mismo, y la consiguiente nube superenergética de roca y metal que se formó prácticamente incendió el cielo de todo el planeta. Los expertos en planeo dinámico, como Jim Cunningham, ingeniero industrial con décadas de experiencia en el diseño de aeronaves, han señalado que las condiciones globales para el planeo debieron de ser imposibles durante el mes posterior al impacto, un tiempo suficiente para matar de hambre a todos los pterosaurios que necesitaran planear para comer.

Está claro que tampoco los voladores de pequeño tamaño lograron volar, dado que también perecieron la mayoría de las aves. Las únicas que sobrevivieron debieron de comer alimentos que resistieran un invierno que podríamos denominar nuclear, como las semillas. También debieron de refugiarse en madrigueras, al igual que hacen muchas aves actuales. No parece que los pterosaurios fueran especialistas en semillas, ni capaces de cavar madrigueras. ¿Por qué deberían de haberlo sido? Un monstruo volador que devora dinosaurios y mide más de cuatro metros de altura no necesita esconderse bajo tierra para evitar el peligro; él es el peligro.

Aunque acabara en extinción, la historia de los pterosaurios resultó exitosa: fueron los auténticos gigantes del aire y desarrollaron un conjunto deslumbrante de caracteres anatómicos extraordinarios que no se han visto en ningún otro grupo anterior o posterior. De ellos hemos aprendido mucho sobre los límites de la forma y la función de los animales. Esas lecciones nos ayudan a comprender la historia de la Tierra y la complejidad de la ecología. Incluso han inspirado la creación de nuevas tecnologías, como diseños novedosos de aeronaves. Su registro fósil es una emocionante ventana a través de la que podemos observar un mundo antiguo lleno de monstruos voladores. Los pterosaurios no solo constituyeron un caso extremo. Fueron excepcionales. IyC

PARA SABER MÁS

On the size and flight diversity of giant pterosaurs, the use of birds as pterosaur analogues and comments on pterosaur flightlessness. Mark P. Witton y Michael B. Habib en *PLOS ONE*, vol. 5, n.º 11, artículo n.º e13982, noviembre de 2010.

The wingtips of the pterosaurs: anatomy, aeronautical function and ecological implications. David W. E. Hone, Matt K. Van Rooijen y Michael B. Habib en *Palaeogeography, palaeoclimatology, palaeoecology*, vol. 440, págs. 431-439, diciembre de 2015.

***Cryodrakon boreas* gen. et sp. nov., a Late Cretaceous Canadian azhdarchid pterosaur.** David W. E. Hone, Michael B. Habib y François Therrien en *Journal of Vertebrate Paleontology*, artículo n.º e1649681, septiembre de 2019.

EN NUESTRO ARCHIVO

Pterosaurios. Wann Langston Jr. en *IyC*, abril de 1981.

Tecnología inspirada en los pterosaurios. Annie Sneed en *IyC*, septiembre de 2014.

Gigantes alados del pasado. Daniel T. Ksepka y Michael Habib en *IyC*, julio de 2016.

NEUROCIENCIA

¿ES REVERSIBLE LA MUERTE?

La reanimación parcial del cerebro de cerdos sacrificados abre interrogantes sobre el momento preciso en el que termina la vida

Christof Koch

«Y la muerte perderá su dominio.» **(Dylan Thomas, 1933)**

Tarde o temprano, todos moriremos, sin excepción, porque todo lo que tiene un principio también tiene un final. Es consecuencia inevitable de la segunda ley de la termodinámica.

A casi nadie le gusta pensar en este hecho perturbador, pero una vez nacidos nos resulta imposible abstraernos por completo de la idea de desaparecer. Nos acecha en las tinieblas del inconsciente y en cualquier momento puede salir a la luz. En mi caso, no me sentí plenamente mortal hasta bien alcanzada la madurez. Fue un día en que había pasado la tarde enganchado a un videojuego violento, disparando a discreción a hordas de alienígenas que me perseguían sin tregua por lóbregos subterráneos, galerías inundadas y túneles laberínticos. Aunque esa noche no me costó conciliar el sueño, me desperté bruscamente al cabo de unas horas. Un conocimiento difuso se había convertido en una realidad palpable: yo también iba a morir, no esa madrugada ni en ese lugar, pero sí algún día.

La evolución ha dotado a nuestra especie de dos mecanismos de defensa poderosos para afrontar esta certeza: la represión psicológica y la religión. El primero nos impide reconocer de forma consciente verdades tan incómodas, mientras que el segundo nos ofrece una vida eterna en el cielo cristiano, un ciclo infinito de reencarnaciones budistas o la posibilidad de transferir nuestra mente a la nube (el éxtasis místico para los tecnófilos del siglo xxi).

La muerte no ejerce el mismo dominio sobre los animales no humanos. Aunque algunos sufren por la pérdida de crías o compañeros, nada demuestra a ciencia cierta que simios, perros, cuervos o abejas tengan suficiente autoconsciencia para que les preocupe la noción de que un día dejarán de existir. Por eso, dichos mecanismos de defensa tienen que haber surgido en un momento reciente de la evolución de los homininos, en los últimos diez millones de años.

Desde tiempo inmemorial, las tradiciones religiosas y filosóficas han predicado lo contrario: hay que mirar de

EN SÍNTESIS

La definición de la muerte ha cambiado a lo largo de los milenios. En su origen se determinaba por el cese de la respiración y del latido cardíaco.

La aparición de los respiradores mecánicos desplazó el lugar anatómico de la muerte, del tórax al encéfalo, y pasó a definirse como el cese de la función cerebral, es decir, el coma irreversible.

La reanimación parcial del cerebro de cerdos sacrificados hacía unas horas, en un experimento reciente, podría poner en cuestión de nuevo las definiciones de la muerte.

ILUSTRACIÓN DE BILL MAYER



frente a la guadaña para librarnos de la angustia que nos provoca. Meditar a diario sobre el «no ser» ayuda a conjurar el miedo. Como científico que empieza a percibir su propia mortalidad, mis reflexiones se dirigen a dilucidar qué es la muerte.

Quienquiera que emprenda esta tarea pronto se percatará de que la muerte —esa amenaza en el horizonte lejano— está mal definida, tanto desde la perspectiva científica como de la médica.

Christof Koch es presidente y director científico del Instituto Allen de Neurociencia, en Seattle. Forma parte del consejo de asesores de *Scientific American* y es autor de *The feeling of life itself: Why consciousness is widespread but can't be computed* (MIT Press, 2019).



DEL CORAZÓN AL CEREBRO

A lo largo de la historia, todo el mundo ha sabido siempre lo que era la muerte. Cuando alguien dejaba de respirar y se le paraba el corazón durante más de unos minutos, se lo consideraba muerto y no había más que hablar; la muerte era un momento bien delimitado en el tiempo. Pero todo esto cambió a mediados del siglo XX con la llegada de los respiradores mecánicos y los marcapasos cardíacos. Los cuidados intensivos modernos desvincularon el aparato cardiopulmonar del cerebro, órgano coordinador de la mente, el pensamiento y la acción.

En 1968, en respuesta a esos avances técnicos, un comité especial de la Escuela de Medicina de Harvard introdujo el concepto de muerte definida por el coma irreversible, es decir, por el cese de las funciones encefálicas. Este cambio cobró fuerza legal en Estados Unidos con la Ley de Determinación Uniforme de la Defunción, de 1981, que define la muerte como la interrupción irreversible de las funciones cardiorrespiratorias o del funcionamiento de las estructuras intracraneales. Dicho llanamente: cuando muere el cerebro, muere la persona.

Esa es la definición que se usa hoy en día, con pocas variaciones, en gran parte del mundo desarrollado. El lugar anatómico donde sobreviene la muerte se desplazó del tórax al encéfalo, pero el momento exacto de esta pasó a ser incierto. La rápida aceptación general de la muerte encefálica, reafirmada en 2008 por una comisión presidencial, contrasta nítidamente con la polémica sobre el aborto y el inicio de la vida, que sigue abierta. Quizá refleje otra asimetría a la que apenas prestamos atención: la gente se obsesiona con lo que sucede después de fallecer, pero casi nunca se plantea dónde estaba antes de nacer.

La gran mayoría de las muertes se producen, aún hoy, tras una parada cardiopulmonar, que, a su vez, pone fin a las funciones encefálicas. La muerte neurológica, definida por el coma arreactivo, la ausencia de reflejos troncoencefálicos y la apnea, suele tener lugar en la unidad de cuidados intensivos, donde ingresan los pacientes con lesiones cerebrales traumáticas o anóxicas o en coma tóxico-metabólico.

El cese de la función encefálica es lo que define la muerte, pero no ayuda a diagnosticarla clínicamente, ya que los procesos biológicos pueden persistir aunque deje de funcionar el cerebro. De hecho, es posible mantener «vivo» o en «soporte vital» a un cuerpo en muerte cerebral durante horas, días e incluso más tiempo. Para los familiares y amigos del difunto, es dificilísimo asumir lo que ocurre: cuando acuden a la UCI, se encuentran que el tórax sube y baja, que tiene pulso, que el color de la piel parece normal y que el cuerpo sigue caliente. Su ser amado, que aparenta estar mejor que otros pacientes, legalmente es un cadáver, por mucho que le siga latiendo el corazón. Los médicos lo mantienen conectado a un respirador, en este estado de «semivida», porque es un donante de órganos en potencia: una vez obtenida la autorización, le extraerán el corazón, los riñones, el hígado o los pulmones, de los que siempre hay una enorme demanda.

Aun después de la muerte cerebral, siguen creciendo las uñas, se suceden las menstruaciones y se conserva cierta función inmunitaria que permite combatir las infecciones. Ha habido más de 30 casos conocidos de gestantes a las que han conectado a un respirador para que llevasen a término el embarazo y alumbrasen a un niño vivo, semanas o meses después de quedarse en muerte cerebral (en un caso, 107 días). En una polémica historia expuesta en 2018 en la revista *New Yorker,* la familia de la adolescente Jahi McMath la conectó a un respirador en su casa de Nueva Jersey después de que declarasen su muerte encefálica en un hospital de California. A efectos legales y según el consenso médico, estaba muerta. Para su familia, permaneció con vida casi cinco años, hasta que falleció por una hemorragia asociada a una insuficiencia hepática.

A pesar de los avances técnicos, la biología y la medicina todavía no explican de forma precisa, coherente y fundamentada qué define el nacimiento y la muerte, las dos lindes que demarcan la vida. Aristóteles escribió en su tratado *Acerca del alma,* hace más de dos mil años, que los seres vivos son más que la suma de sus partes; el filósofo propugnaba que el alma vegetativa de todo organismo (planta, animal o persona) es la forma o la esencia de ese ser vivo.

El alma vegetativa rige las funciones de nutrición, crecimiento y reproducción, que dependen del cuerpo; cuando desaparecen dichas capacidades vitales, ya no estamos ante un organismo animado (término que proviene del latín *anima,* «alma»). El alma sensitiva permite a los animales y las personas percibir el mundo y su cuerpo; es lo más próximo a lo que actualmente llamamos «experiencia consciente». Por último, el alma racional, que es exclusiva del ser humano, regula la razón, el lenguaje y el habla; hoy en día esta facultad la imitan cada vez mejor los algoritmos de inteligencia artificial.

En la actualidad, los avances en aprendizaje automático, genómica, proteómica y macrodatos nos hacen creer falsamente que entendemos qué es el alma vegetativa, pero ocultan nuestra profunda ignorancia sobre qué la conforma. Definir lo que constituye el cuerpo con vida de una persona —sin duda, algo más que la suma de sus órganos— sigue siendo un reto conceptual. ¿Cómo podemos delimitarlo en el espacio? ¿Forman parte de él la ropa, los implantes dentales o las lentes de contacto? ¿Y en el tiempo? ¿Cuándo empieza y cuándo se acaba?

Fijémonos en la palabra *irreversible* dentro de la definición contemporánea de muerte encefálica. Sin una fórmula conceptual clara que indique cuándo está vivo o muerto un organismo, la irreversibilidad depende de la tecnología vigente en cada momento, que evoluciona sin parar. Lo que era irreversible a principios del siglo XX (la abolición de la función respiratoria) pasó a ser reversible menos de cien años después. ¿Tanto cuesta imaginar que quizás ocurra lo mismo con las funciones encefálicas? Un experimento reciente sugiere que esta idea ya no es mera fantasía.

REANIMACIÓN PARCIAL DEL CEREBRO

Este año, un extenso equipo de médicos y científicos de la Escuela de Medicina de Yale, dirigido por Nenad Sestan, aprovechó los centenares de cerdos sacrificados en un matadero autorizado por el Departamento de Agricultura estadounidense para un

experimento sorprendente, publicado en la revista *Nature*. Los investigadores extrajeron el cerebro del cráneo de los animales y conectaron las arterias carótidas y las venas del órgano a una máquina de perfusión que actuaba como un corazón: bombeaba un sucedáneo de sangre, una mezcla artificial de compuestos que transportaban oxígeno y fármacos para evitar que las células sufrieran daños. La magia reside en la composición exacta de la solución bombeada. Pensemos, por hacer un paralelismo, en los circuitos cerrados de diálisis, gracias a los cuales miles y miles de pacientes con nefropatía terminal depuran las toxinas del cuerpo.

La máquina del experimento es necesaria porque cuando la sangre deja de irrigar el cerebro, un órgano voluminoso que consume mucha energía, las reservas de oxígeno se agotan en cuestión de segundos y la consciencia se apaga. Si se priva al cerebro de sangre y oxígeno durante más de unos minutos, se desencadenan daños irreparables. Las células comienzan a degenerarse a través de diferentes procesos (lesiones y descomposición del tejido, edema, etcétera) que son fácilmente visibles con el microscopio.

Sestan y su equipo estudiaron la viabilidad de los cerebros de los cerdos cuatro horas después del aturdimiento por electronarcosis, el degüello y el sangrado. Para ello, compararon diversos indicadores biológicos con los de una serie de cerebros de control, que no conectaron a la máquina perfusora hasta cuatro horas después del sacrificio, toda una eternidad para el sistema nervioso.

A primera vista, los cerebros conectados parecían relativamente normales. Al circular el líquido, se observó que la intrincada red vascular que irriga el cerebro respondía adecuadamente; se conservó la integridad del tejido y se redujo el edema que provoca la muerte de las células; las sinapsis, las neuronas y sus axones (prolongaciones citoplasmáticas que transmiten los impulsos nerviosos) tenían aspecto normal. Se constató cierta funcionalidad de la neuroglía (el conjunto de células que desempeñan funciones de sostén de las neuronas); y el cerebro consumía oxígeno y glucosa, lo cual demostraba cierta actividad metabólica. El título del artículo proclama sin ambages: «Restablecimiento de la circulación y las funciones celulares del cerebro horas después de la muerte».

Lo que no se observó fueron las ondas cerebrales propias de los electroencefalogramas. Los electrodos colocados en la superficie de los cerebros no detectaron actividad eléctrica global: ni las ondas lentas que cruzan la corteza cerebral a un ritmo constante durante el sueño profundo, ni las exacerbaciones abruptas seguidas de un silencio, el denominado patrón paroxístico. Solo apareció una línea recta (una línea isoeléctrica global), que denotaba la ausencia de cualquier tipo de consciencia. Un cerebro que guarda silencio (en términos eléctricos) no alberga experiencia psíquica alguna. En todo caso, esta situación no fue ninguna sorpresa; por el contrario, el equipo de Sestan la buscó expresamente, añadiendo en la solución perfundida una mezcla de fármacos que anulan las funciones neuronales y las comunicaciones sinápticas.

No obstante, aunque no se detectaran ondas electroencefalográficas, como neurocientífico me sorprendió que algunas neuronas corticales conservasen la capacidad de generar actividad eléctrica y sináptica. Para demostrarlo, los investigadores de Yale extrajeron una fina sección del tejido neural, eliminaron la solución de perfusión y aplicaron una corriente eléctrica para excitar las neuronas. Algunas respondieron adecuadamente, generando los impulsos característicos (potenciales de acción o «picos») que constituyen el lenguaje universal de todo sistema nervioso avanzado.

Este hallazgo suscita una pregunta acuciante: ¿qué habría pasado si los científicos no hubiesen añadido neurobloqueantes a la solución? Lo más probable, nada. Que unas pocas neuronas conserven una mínima excitabilidad no implica que millones de ellas vayan a reorganizarse espontáneamente y recobrar la actividad eléctrica global. Pese a todo, no es descartable que, con un poco de ayuda externa, con algo así como un desfibrilador cortical, se pudiese «reiniciar» un cerebro muerto y reanimar los ritmos encefálicos característicos del órgano vivo.

Huelga decir que degollar a una criatura sensible y dejar que se desangre no contribuye a su bienestar. Reanimarla después de un acto tan traumático sin duda comportaría un estado de patología extrema, crisis epilépticas generalizadas, dolor profundo, cuadros confusionales y ansiosos agudos, psicosis, etcétera. Jamás debería infligirse tamaño sufrimiento a ningún ser vivo, y precisamente para evitarlo el equipo de Yale bloqueó las funciones neuronales.

Llegados a este punto, ya no podemos demorar más la pregunta obvia: ¿se puede aplicar esta técnica al cerebro humano? Antes de horrorizarnos, pensemos lo siguiente: si apareciera nuestro hijo, o nuestra pareja, ahogado o víctima de una sobredosis, sin pulso ni aliento desde hace horas, ¿qué querríamos que hicieran los médicos? Hoy en día los declararían muertos. ¿Podría cambiar esta situación mañana, con la técnica que ha diseñado el equipo de Yale? ¿No es acaso un fin noble?

El cerebro porcino es grande, a diferencia del del ratón, que es el animal preferido para los experimentos de laboratorio. Además, su corteza tiene muchas circunvoluciones, igual que la humana. Las intervenciones neuroquirúrgicas se prueban sistemáticamente en los cerdos antes de pasar a las personas. Así que, desde un punto de vista técnico, la respuesta es afirmativa: en principio, sí, la técnica podría aplicarse al cerebro humano. Pero ¿debemos hacerlo?

Sin duda, no hasta que no sepamos si el cerebro reanimado de un animal presenta la actividad eléctrica global típica de un cerebro sano, sin señales indicativas de dolor, sufrimiento o angustia extremos. Los profesionales de nuestro campo deberíamos detenernos en pleno a sopesar las cuestiones médicas, científicas, jurídicas, éticas, filosóficas y políticas inherentes a este tipo de investigaciones, junto con todas las partes interesadas, antes de proseguir.

Sea como sea, el miedo a la guadaña es innegable. Tarde o temprano, en algún lugar del planeta, alguien intentará burlar a la muerte. IyC

PARA SABER MÁS

A definition of irreversible coma: Report of the ad hoc committee of the Harvard Medical School to examine the definition of brain death. *JAMA*, vol. 205, n.º 6, págs. 337-340, agosto de 1968.

The undead: organ harvesting, the ice-water test, beating-heart cadavers—How medicine is blurring the line between life and death. Dick Teresi. Pantheon, 2012.

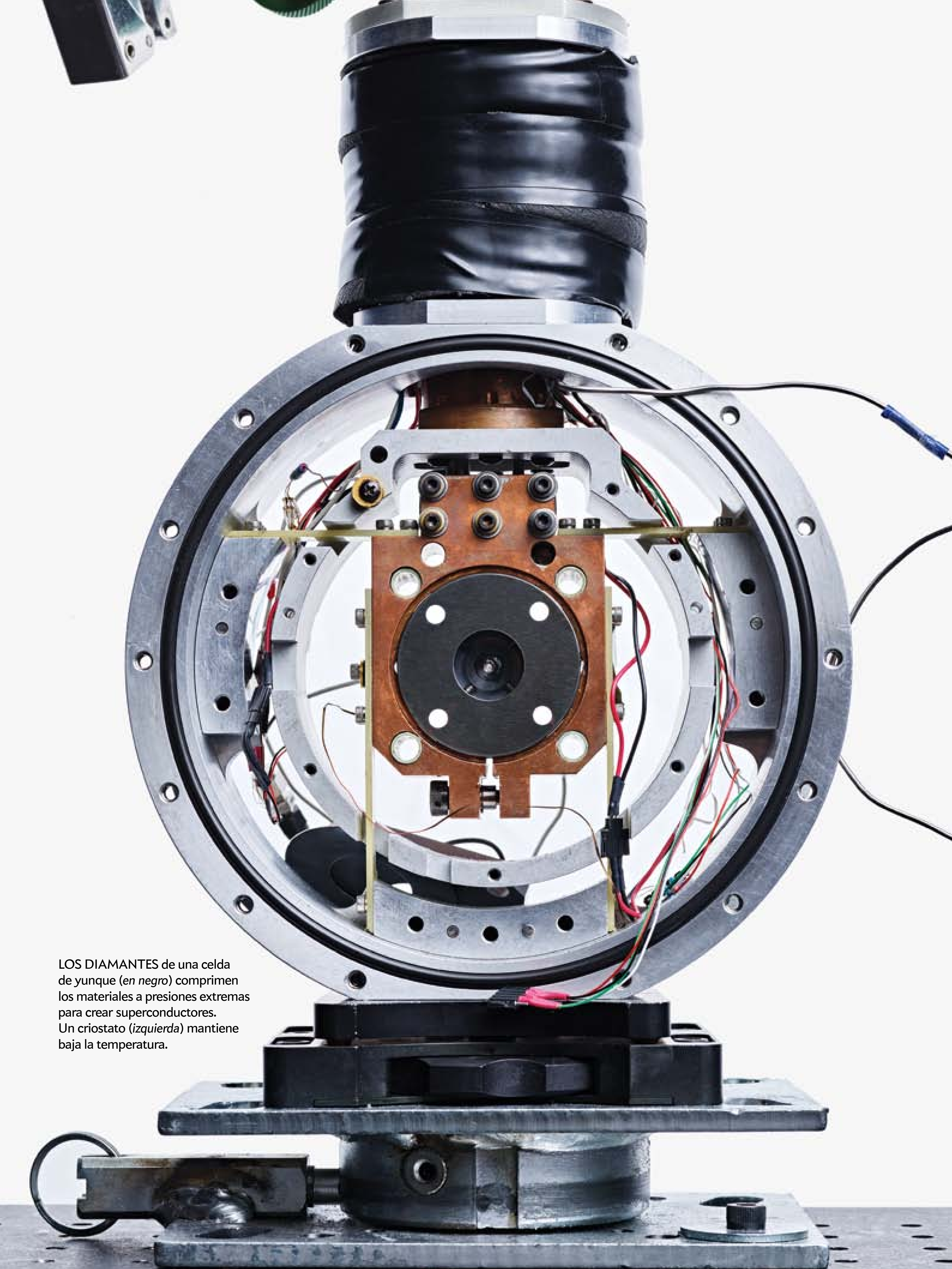
Modern death—How medicine changed the end of life. Haider Warraich. St. Martin's Press, 2017.

Restoration of brain circulation and cellular functions hours post-mortem. Zvonimir Vrselja et al. en *Nature*, vol. 568, págs. 336-343, abril de 2019.

EN NUESTRO ARCHIVO

Qué ocurre en nuestro encéfalo cuando morimos. Anna Von Hopffgarten en *MyC* n.º 93, 2018.

Recuperación cerebral tras la muerte. Simon Makin en *IyC*, junio de 2019.



LOS DIAMANTES de una celda de yunque (*en negro*) comprimen los materiales a presiones extremas para crear superconductores. Un criostato (*izquierda*) mantiene baja la temperatura.

FÍSICA

EL MATERIAL SOÑADO



¿Podrán los nuevos avances teóricos y computacionales conducir al esquivo superconductor a temperatura ambiente?

Bob Henderson

Fotografías de Spencer Lowell

Bob Henderson es periodista científico y doctor en física teórica de altas energías por la Universidad de Rochester. Además ha ejercido como fotoperiodista, ingeniero eléctrico y analista y agente financiero.



A Maddury Somayazulu, físico experimental conocido como Zulu, solo le cabía esperar que bastara con estar cerca. En una sala atestada de instrumentos del Laboratorio Nacional Argonne, en EE.UU., trabajaba con el investigador posdoctoral Zachary Geballe sobre un aparato cilíndrico del tamaño de una ciruela llamado celda de yunque de diamante. Su interior contenía una pequeña mota de lantano, un metal del grupo de las tierras raras, y un poco de hidrógeno gaseoso. Según los teóricos, estos ingredientes podrían formar un nuevo compuesto a una presión de 2,1 millones de atmósferas, más de la mitad de la que existe en el centro de la Tierra. Pero lo más relevante en ese día de junio de 2017 era que esa presión estaba cerca del límite que podía alcanzar la celda de yunque al comprimir la muestra entre sus dos diamantes, uno de los materiales más duros de la naturaleza. Cuando los científicos apretaron los tornillos para llegar a 1,7 millones de atmósferas, notaron que el aparato oponía resistencia. Los diamantes, ya deformados, podían romperse. «Vale, ya está. No podemos aumentar más la presión», dijo Somayazulu. «Intentemos sintetizarlo y veamos qué pasa.»

Habían rodeado la celda de yunque con una especie de comando de alta tecnología: dos largos tubos para bombardear la muestra con rayos X, un sistema de lentes y espejos para irradiarla con un láser y una cámara para grabar el ataque. La esperanza era que, al activarlo, el láser catalizara la reacción entre el lantano y el hidrógeno. Fuera de la sala, tras una puerta metálica que les protegía de los rayos X, los científicos observaban una pantalla con un gráfico que mostraba la estructura microscópica de la mezcla vista a través de los rayos X. El gráfico pronto tomó la forma deseada: habían conseguido producir hidruro de lantano (LaH_{10}). «Nos sorprendió», reconoce Somayazulu. «Ni siquiera tuvimos que calentar mucho la muestra para formar el compuesto.» No se trataba de un compuesto cualquiera.

La teoría y las simulaciones numéricas indicaban que el LaH_{10} podía ser un superconductor, un material capaz de conducir la electricidad sin las pérdidas de energía que sufren los cables convencionales. Eso permite concentrar una cantidad prodigiosa de corriente en un espacio pequeño y hacer que circule eternamente. Y lo que es mejor: se suponía que el LaH_{10} podía exhibir ese extraordinario comportamiento a 7 grados Celsius (280 kelvin), una temperatura mucho mayor que la que requieren los superconductores conocidos y fascinantemente cercana al objetivo de la temperatura ambiente. Las bajas temperaturas a las que operan los superconductores existentes han limitado su uso a ámbitos muy especializados, como los aparatos de imagen por resonancia magnética o los aceleradores de partículas. Pero un material superconductor a temperatura ambiente podría emplearse para muchos otros fines, como transportar energía solar y eólica a grandes distancias o incrementar la capacidad de las saturadas redes eléctricas, así como en incontables aplicaciones en informática y medicina.

El análisis de rayos X realizado por Somayazulu y Geballe indicaba que el LaH_{10} producido tenía exactamente la estructura microscópica predicha por los teóricos. «Eso nos impactó», me aseguraba Somayazulu durante una reciente visita a Argonne, laboratorio donde trabaja desde el pasado mayo. Cuando él y sus colegas sintetizaron el LaH_{10}, todavía trabajaba en la Institución Carnegie para la Ciencia, en Washington. Su jefe de entonces, Russell Hemley, se refiere al LaH_{10} como «un bello ejemplo de material de diseño». Hemley lideró el equipo que generó el compuesto, así como el grupo teórico que predijo su existencia y propiedades. «Primero creamos el material en un ordenador y un cálculo nos dijo dónde buscarlo», explica.

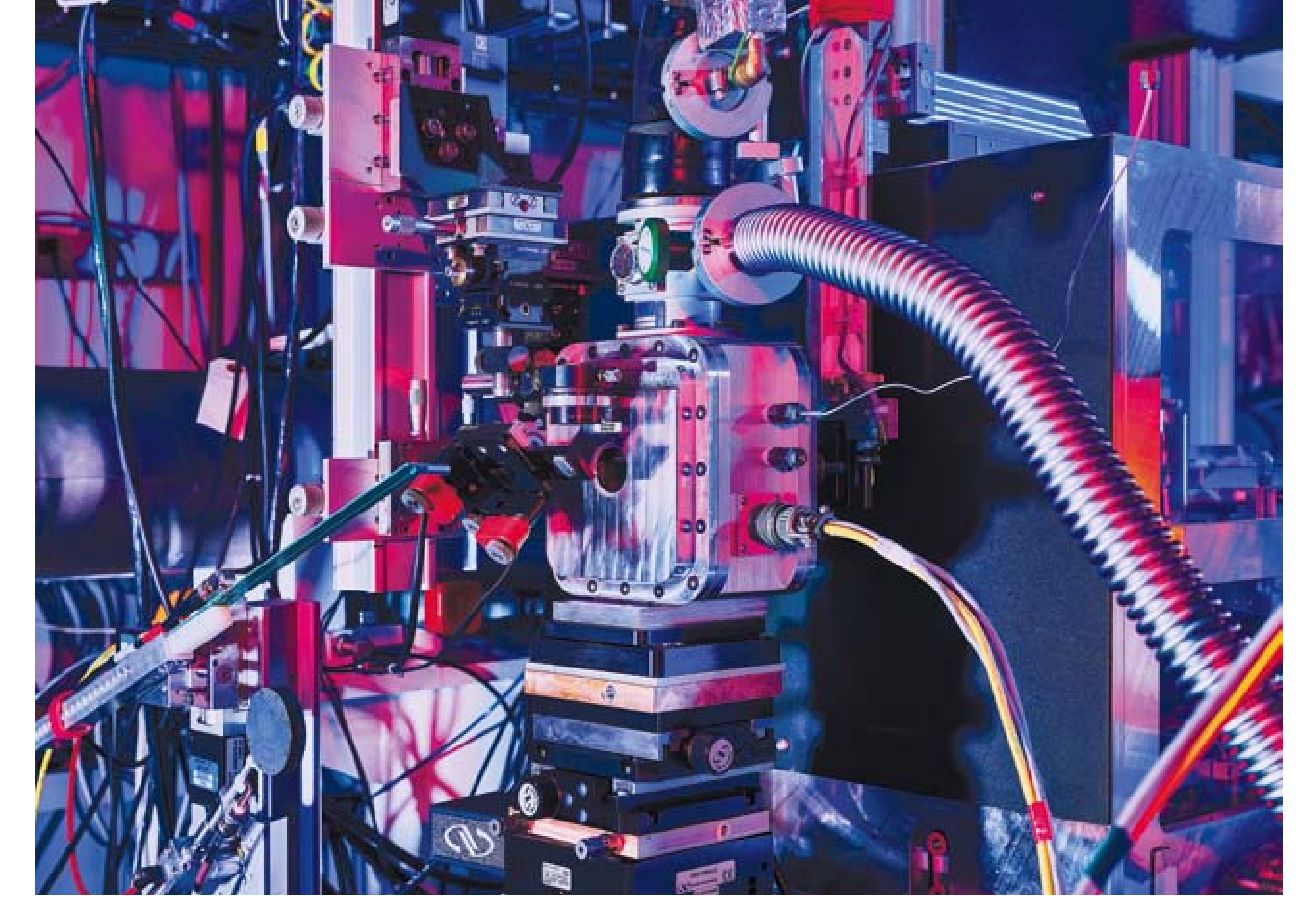
Eso es lo realmente novedoso del LaH_{10}. Los científicos llevan más de un siglo buscando superconductores de alta temperatura, pero casi todos los progresos han llegado gracias a una combinación de conjeturas —en esencia, ir probando diferentes ingredientes y procesos, con la esperanza de que alguno funcione—

EN SÍNTESIS

Los científicos sueñan con crear un superconductor (un material que conduce la electricidad sin resistencia) que pueda operar a temperatura ambiente. Hasta el momento todos requieren temperaturas bajas y, en algunos casos, presiones elevadas.

El descubrimiento de nuevos materiales superconductores tradicionalmente ha llegado por ensayo y error. Pero ahora también es posible predecirlos mediante modelos teóricos que emplean técnicas como el aprendizaje automático.

Combinando avances teóricos y destreza experimental, los físicos esperan descubrir superconductores más útiles y que puedan ampliar el alcance de las energías renovables, mejorar las redes eléctricas o diseñar baterías que nunca pierdan su carga.



LOS NUEVOS SUPERCONDUCTORES se sintetizan en el interior de celdas de yunque de diamante, como la que hay tras la ventana circular situada en el centro de este criostato del Laboratorio Nacional Argonne, en Estados Unidos.

y buena suerte. Solo hay otro ejemplo de un superconductor de alta temperatura profetizado por un programa informático: el H_3S, una sustancia descubierta en 2014 y que también pertenece a la clase de compuestos del hidrógeno conocidos como hidruros. Pero incluso en este caso sus creadores estaban intentando producir algo diferente. Las altas presiones (capaces de romper el diamante) necesarias para mantener los hidruros intactos hacen muy difícil que estos lleguen a ser útiles. Pero los algoritmos que los anticiparon, junto a otros avances computacionales recientes, podrían convertir la búsqueda de superconductores más prácticos en una actividad más sistemática y, posiblemente, más fructífera.

UNA TEORÍA DE LA SUPERCONDUCTIVIDAD

«El LaH_{10} llegó como caído del cielo», afirma Somayazulu, recordando los años de trabajo que condujeron al descubrimiento de este material. Claramente entusiasmado cuando relata la historia, parece que aún le cueste creer su éxito. Y admite que, si no hubiera sido por los nuevos algoritmos y sus predicciones, todavía estaría perdido en una maraña de «ideas generales» y «química de bachillerato».

Pero una vez producido el LaH_{10}, todavía tenía que pensar cómo comprobar si se trataba de un material superconductor. Desde el descubrimiento de la superconductividad en 1911 (cuando el físico neerlandés Heike Kamerlingh Onnes observó que la resistencia eléctrica de un cable de mercurio inmerso en helio líquido desaparecía a 4,2 kelvin) el hallazgo de nuevos materiales superconductores por lo general ha precedido a las teorías que los explican. A pesar de que la superconductividad ha resultado ser bastante común y que muchos otros elementos químicos la exhiben (todos por debajo de 10 kelvin), no fue posible entenderla hasta el desarrollo de la mecánica cuántica en la década de 1920. La explicación tiene que ver con el hecho de que los electrones responsables de la conducción eléctrica puedan comportarse como partículas localizadas y como ondas, tal y como establece la mecánica cuántica para cualquier partícula subatómica. Sobre esta base, John Bardeen, Leon N. Cooper y John Robert Schrieffer formularon en 1957 una teoría conocida como BCS (a partir de sus iniciales) que describe la física de los superconductores.

La teoría parte de la manera que tienen los científicos de entender la corriente eléctrica: en el interior de un metal, los átomos (más concretamente, los núcleos atómicos y algunos electrones ligados a ellos) forman una red cristalina: una estructura con un patrón regular. Además hay un mar de electrones libres que, al aplicar un voltaje, fluyen a través de la red y dan lugar a la corriente eléctrica. En condiciones normales, las imperfecciones de la red obstaculizan este flujo y crean resistencia eléctrica. Sin embargo, según la teoría BCS, los electrones pueden evitar esta fricción aprovechando los movimientos de la red en su propio beneficio.

Un electrón que viaja a través de la red desplaza a su paso los átomos de esta debido a la atracción entre la carga negativa del electrón y la positiva de los átomos ionizados. Esa distorsión de la red produce una concentración de cargas positivas, la cual atrae un segundo electrón a la estela del primero. Ambos electrones se unen entonces en lo que se conoce como un «par de Cooper». A continuación, dichos pares, comportándose más como ondas que como partículas, se solapan, se sincronizan y se fusionan en un «condensado de Bose-Einstein», descrito por una onda tan grande que no puede ser obstaculizada por la red y que fluye a través de ella sin resistencia.

La teoría BCS ha acumulado numerosos éxitos predictivos, como la temperatura crítica por encima de la cual un superconductor pierde sus superpoderes. Pero, en general, no ha resultado de gran ayuda para encontrar superconductores con temperaturas críticas más elevadas. De hecho, el físico experimental Bernd Matthias (que entre las décadas de 1950 y 1970 descubrió cientos de superconductores, muchos de ellos aleaciones metálicas, a base de probar innumerables materiales en su laboratorio) consideraba que la teoría BCS era irrelevante para su búsqueda. Su trabajo se guiaba en gran medida por cinco reglas empíricas relacionadas con las propiedades del material (por ejemplo, «tener una gran simetría es bueno») y un principio general: «mantenerse alejado de los teóricos».

Pese a los muchos éxitos de Matthias, entre 1955 y 1973 la mayor temperatura crítica observada solo aumentó ligeramente: de 17 a 23 kelvin. Permaneció en ese último valor hasta 1986, cuando Georg Bednorz y Alex Müller, dos científicos de la IBM en Zúrich, descubrieron la superconductividad en una clase de materiales cerámicos con una compleja estructura de capas llamados cupratos. Estos materiales aún conservan el record de temperatura crítica a presión ambiente, conseguido en 1993: 135 kelvin. A diferencia de Matthias, Bednorz y Müller «tenían una visión teórica muy sólida de lo que estaban buscando», afirma el físico de la Universidad de Chicago Peter Littlewood, «aunque sus ideas probablemente no eran correctas».

Y no lo eran porque estaban basadas en la teoría BCS, que recurre a las vibraciones de la red atómica, o fonones, para explicar los pares de Cooper. Aunque se cree que estos pares (y el condensado de Bose-Einstein que generan) están detrás de la superconductividad de los cupratos, muchos expertos piensan que la formación de los pares de Cooper en estos materiales depende de algún modo de la interacción electromagnética directa entre los electrones, en lugar —o, al menos, además— de la mediada por los fonones. Desgraciadamente, esas interacciones directas son tan difíciles de modelizar matemáticamente que, tras más de tres décadas de intensa investigación, aún no existe una teoría equivalente a la BCS para los cupratos. Ni siquiera hay consenso sobre los detalles del mecanismo de apareamiento de los electrones. Los científicos agrupan los cupratos en un cajón de sastre junto con otras clases de superconductores cuyo comportamiento parece depender de varios tipos de interacciones directas electrón-electrón. A estos materiales se les denomina superconductores no convencionales para distinguirlos de los gobernados por los fonones, descritos por la teoría BCS.

Así que Bednorz y Müller encontraron lo que buscaban, aunque no funcionaba como ellos pensaban. Y ese tipo de serendipias son típicas de la superconductividad. En 2006, por ejemplo, los científicos se toparon con los superconductores basados en el hierro (otra clase no convencional sin una teoría que los describa o prediga) mientras investigaban cómo mejorar las pantallas planas. Según Littlewood, «casi siempre ocurre que el descubrimiento de algún material extraño nos revela un nuevo mecanismo [de apareamiento de electrones] en el que no habíamos reparado».

LA BARRERA TÉRMICA

A la superconductividad le gusta el frío, explica Michael Norman, científico de materiales de Argonne, porque la temperatura es mala para mantener el comportamiento cuántico ondulatorio a escalas macroscópicas útiles. La energía térmica tiende a romper los pares de Cooper y destruye el estado cuántico coordinado de un condensado ondulatorio.



MADDURY SOMAYAZULU lleva décadas intentado crear superconductores que puedan operar a temperaturas elevadas.

El número de pares de un condensado y la intensidad del enlace que los mantiene unidos definen una barrera contra la disrupción térmica. La temperatura crítica de un superconductor representa la altura de esta barrera, por encima de la cual el material sucumbe al calor. Por ejemplo, se cree que los cupratos tienen barreras altas porque la interacción directa entre los electrones produce pares de Cooper más robustos que los formados por la acción indirecta de los fonones.

No obstante, Norman considera que «ya nadie duda de que puedan existir superconductores a temperatura y presión ambientes», en parte por el ritmo al que siguen apareciendo nuevos superconductores y mecanismos de apareamiento. Incluso cuando hablamos de superconductores estándar, no existe un «límite fundamental» para la temperatura crítica, señala Igor Mazin, físico del Laboratorio de Investigación Naval de EE.UU., en Washington. Lo que hay, continúa, es «una especie de límite estadístico», es decir, simplemente es menos probable que existan esos materiales. Los apareamientos mediados por fonones tienden a ser más fuertes en redes más flexibles: una red perfectamente rígida no podría desarrollar superconductividad convencional, ya que esta requiere que los electrones deformen el retículo. Por lo tanto, las interacciones excepcionalmente intensas necesarias para que se produzca superconductividad convencional a altas temperaturas parecen exigir un tipo especial de estructura cristalina.

Así que los superconductores a temperatura ambiente, si existen, son sin duda poco comunes. Pero podrían materializarse de tantas maneras distintas que nadie pierde la esperanza de encontrarlos: los aproximadamente 100 elementos estables de la tabla periódica darían lugar a 4950 combinaciones de dos elementos, 161.700 combinaciones de tres y así sucesivamente. Si incluimos la estequiometría (las proporciones de los elementos en un compuesto) y la estructura de las redes, las posibilidades

son ilimitadas. Ahora bien, ¿cómo pueden encontrar los científicos estos materiales excepcionales en tal pajar químico?

EL SUEÑO DE LOS SUPERCONDUCTORES

Una mañana de noviembre de 2017, Somayazulu cavilaba mientras conducía al trabajo. La comprobación de la superconductividad del LaH_{10} no iba bien. Era necesario reemplazar una junta metálica por un material aislante en la celda de yunque de diamante para evitar cortocircuitos durante las medidas de la resistencia. Pero, durante meses, el hidrógeno se había fugado invariablemente de todos los diseños que había probado su equipo. «Cada día discutíamos sobre ello y lo intentábamos de nuevo», rememora Somayazulu. «Era muy frustrante.»

Entonces, en mitad de un atasco, tuvo una idea: «¿Por qué no usamos una fuente de hidrógeno sólida?». Somayazulu pensó que el borazano, una sustancia rica en hidrógeno que conocía por investigaciones anteriores, podría liberar este elemento de la forma adecuada. Tras refinar el experimento durante varios meses, el diseño funcionó. Y así, al enfriar la muestra, pudo ver cómo la resistencia del LaH_{10} se desplomaba al llegar a los 265 kelvin. Inmediatamente tomó una foto con su teléfono móvil, justo antes de que el programa informático del experimento colapsara y los diamantes de la celda se desintegraran. La fotografía fue todo lo que quedó de su gesta, y transcurrirían otros seis meses antes de que pudieran repetirla.

Somayazulu había pasado casi un cuarto de siglo intentando comprimir hidrógeno para producir un superconductor. Era un sueño que Hemley llevaba décadas persiguiendo, a partir de una predicción realizada en 1968 por el físico Neil Ashcroft, de la Universidad Cornell. Conseguirlo podría requerir una presión de unos 10 millones de atmósferas, como admitió Ashcroft en 1983. Pero también teorizó que ese número podría reducirse añadiendo al hidrógeno un segundo elemento que hiciese de cuña y rompiese las moléculas de H_2 que tienden a formarse. Los átomos de hidrógeno así liberados podrían vibrar de la forma adecuada para producir superconductividad convencional a alta temperatura: los flexibles enlaces entre los átomos favorecerían un fuerte acoplamiento de los electrones; y su baja masa atómica generaría fonones de frecuencias inusualmente altas, lo que atraería muchos electrones al condensado.

Tras llegar a Washington desde la India en 1994 para trabajar como investigador posdoctoral con Hemley, Somayazulu se pasó años pulverizando y calentando de distintas formas multitud de mezclas de hidrógeno. Descubrió mucha física interesante, pero nada de superconductividad. «Aquí estaba yo intentando dopar hidrógeno con todo tipo de cosas», comenta, «y sometiéndolo a presiones cada vez más altas sin que ocurriese nada. Y pensaba, “¿estará equivocado Ashcroft?”».

Ashcroft estaba en lo cierto, pero hizo falta un nuevo tipo de programas informáticos de búsqueda de estructuras para demostrarlo. Dichos programas buscan compuestos viables moviendo virtualmente los átomos hasta encontrar una estructura cristalina estable (aquella con la menor capacidad de perder energía en forma de calor, de acuerdo con el segundo principio de la termodinámica). Algunos programas usan una estrategia evolutiva que comienza con un grupo de estructuras, las mezcla y selecciona los resultados más adecuados. El proceso se itera hasta encontrar la red óptima, y entonces los científicos aplican la teoría BCS para evaluar el potencial superconductor de la estructura y calcular su temperatura crítica.

En 2012, un grupo de investigación de China liderado por Yanming Ma usó uno de estos programas para predecir que —en

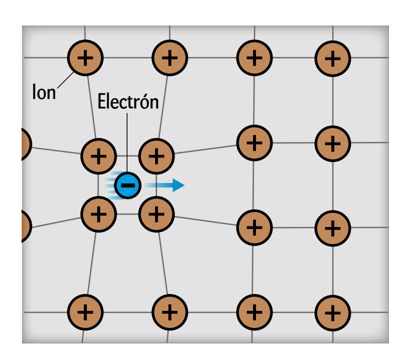
JEN CHRISTIANSEN

TEORÍA BCS

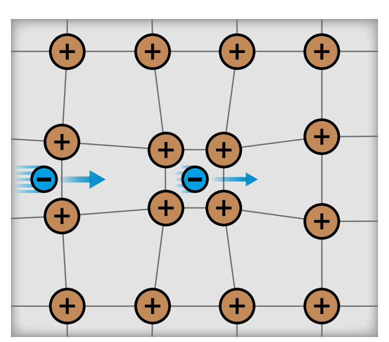
Introducción a los superconductores

En el interior de un superconductor tienen lugar complejos efectos cuánticos que permiten que la electricidad fluya sin resistencia. La teoría BCS (por las iniciales de los tres científicos que la formularon) da una imagen básica de este proceso. Con todo, los físicos creen que en muchos materiales superconductores los detalles son más complicados.

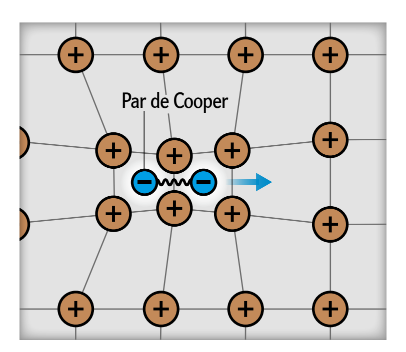
1 Cuando un electrón, cargado negativamente, se mueve a través de una red de iones con carga positiva, estos se ven atraídos por el electrón y la red se deforma.



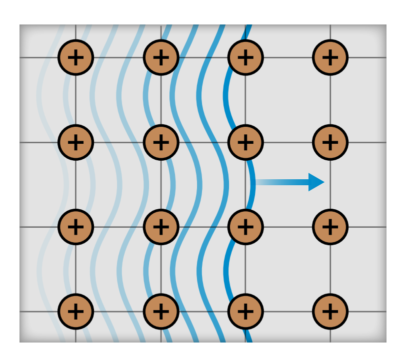
2 La acumulación de carga positiva resultante atrae un segundo electrón hacia el primero.



3 Ambos electrones establecen una conexión que los convierte en una única entidad, conocida como par de Cooper.



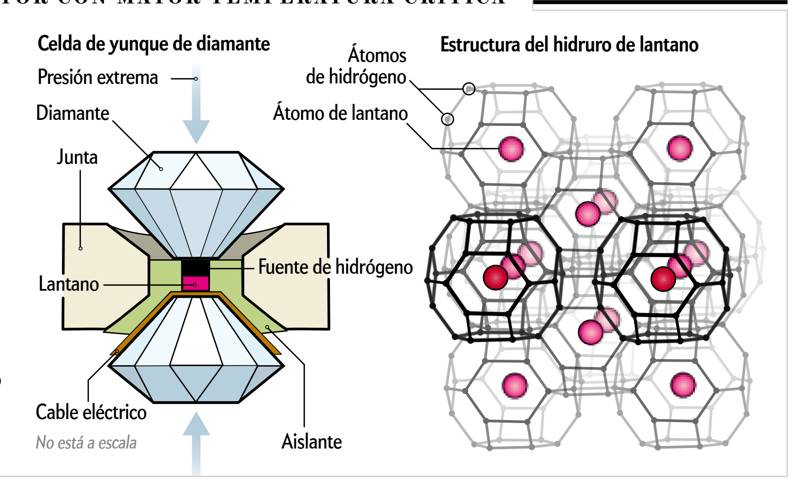
4 Un gran número de pares de Cooper se sincronizan y se combinan para crear un condensado de Bose-Einstein, descrito por una onda tan grande que puede atravesar la red sin resistencia.



EL SUPERCONDUCTOR CON MAYOR TEMPERATURA CRÍTICA

Hidruro de lantano

El hidruro de lantano (LaH_{10}) es el superconductor con mayor temperatura crítica que se conoce. Puede operar a una temperatura sorprendentemente alta, -8 grados Celsius, y posiblemente a temperaturas mayores, aunque requiere presiones elevadísimas. Los científicos crearon el LaH_{10} en 2017 usando una celda de yunque de diamante para comprimir el hidrógeno y el lantano. El material resultante consta de una red de átomos de hidrógeno alrededor de un único átomo de lantano (*rosa*). Esta estructura en forma de jaula parece favorecer la superconductividad.



consonancia con las ideas de Ashcroft— el hidruro de calcio (CaH_6) podría producirse a las presiones generadas en una célula de yunque de diamante y mostraría superconductividad a temperaturas altas. Hemley y su equipo no tardaron en ponerse a machacar calcio e hidrógeno. Y no fueron los únicos.

Otra de las predicciones de Ma era que el mismo sulfuro de hidrógeno (H_2S) que liberan los huevos podridos sería superconductor a 80 kelvin bajo suficiente presión. Siguiendo esta idea, en 2014, un grupo de Alemania dirigido por Mikhail Eremets comprimió el apestoso gas en una célula de yunque de diamante y observó —para su sorpresa— que se convertía en superconductor a 203 kelvin. Eremets había encontrado por casualidad otro compuesto superconductor, el H_3S, que mantuvo el record de mayor temperatura crítica hasta la síntesis del LaH_{10}.

La búsqueda de Hemley se había convertido en una carrera. En 2017, con la ayuda de Hanyu Liu, investigador posdoctoral procedente del grupo de Ma, empleó un algoritmo de búsqueda de estructuras para predecir el LaH_{10} y dio a su grupo el pistoletazo de salida que conduciría a la síntesis del compuesto. Pronto Eremets también lo logró, confirmando la reveladora caída de la resistencia eléctrica. Más recientemente, sometió al material a una batería de pruebas más completa para confirmar su compatibilidad con la teoría BCS. Y pasó el examen.

Estos descubrimientos combinan elementos diseñados y sorpresas. El LaH_{10}, por ejemplo, surgió de la sugerencia de Hemley de que Liu se centrara en compuestos con la mayor cantidad posible de hidrógeno, para ajustarse al máximo a la idea original de Ashcroft. Por otro lado, se cree que el comportamiento a altas temperaturas del LaH_{10} se debe en parte a los modos vibracionales de su peculiar estructura de clatrato, en la que los átomos de hidrógeno forman una «jaula» alrededor de un átomo de lantano. Una configuración que los teóricos «nunca habrían adivinado», según Eva Zurek, química computacional de la Universidad de Búfalo. Pero ya sea diseño o sorpresa, los nuevos programas han permitido que teóricos como Ma y Zurek cobren más relevancia en la búsqueda de superconductores. «Creo que los experimentales nos toman mucho más en serio que antes», corrobora Zurek.

PRINCIPIOS DE DISEÑO

Una cosa es que los teóricos aceleraran el descubrimiento del H_3S y el LaH_{10}, superconductores convencionales descritos por la teoría BCS, y otra (mucho más sorprendente) que puedan hacer lo mismo en el caso de superconductores no convencionales, para los que los físicos no tienen ninguna teoría.

El LaH_{10} no fue la única gran noticia de 2018 relacionada con la superconductividad. La otra fue el descubrimiento de este fenómeno en el grafeno bicapa rotado. El grafeno es una lámina (de espesor monoatómico) de átomos de carbono dispuestos en una red hexagonal. El grafeno bicapa rotado consta de dos de dichas láminas superpuestas paralelamente pero rotadas de modo que sus redes formen un determinado ángulo. A pesar de su baja temperatura crítica de tan solo 1,7 kelvin, este material tiene pares de Cooper inusualmente robustos. Dada su sencilla estructura con un único elemento, existe la esperanza de entenderlo teóricamente y de que eso ayude a explicar de manera general la superconductividad no convencional.

Este descubrimiento está a caballo entre la casualidad y la predicción informática. «Es mitad y mitad», confirma Pablo Jarillo-Herrero, el físico valenciano que lidera el grupo del Instituto de Tecnología de Massachusetts responsable del descubrimiento. El material presenta superconductividad solo cuando el ángulo toma el «valor mágico» de 1,1º, un número que apareció por primera vez en un modelo por ordenador. Pero, aunque los teóricos predijeron que la interacción entre electrones presentaría un máximo para este ángulo, no se percataron de que eso generaría superconductividad. La sorpresa surgió en el laboratorio.

No obstante, el hallazgo pone de relieve el potencial de lo que Norman llama «principios de diseño»: cantidades calculables que pueden ayudar a predecir la superconductividad incluso a falta de una teoría completa. Las primeras cinco reglas de Matthias eran principios de este tipo, aunque al trabajar con superconductores no convencionales acabaron por aparecer excepciones a cada una de ellas. Pero en un artículo de 2016, Norman señaló que existen similitudes incluso entre los superconductores no convencionales de distintos tipos, como por ejemplo en muchas características de sus diagramas de fases (gráficas que muestran cómo cambian las propiedades del material con variables como la presión y la temperatura). También se percató de que las estructuras cuasibidimensionales en capas como la de los cupratos parecen dar lugar a temperaturas críticas elevadas, y de que ciertas estructuras cristalinas parecen ser más propicias. Norman razonó que irían surgiendo más principios de diseño a medida que apareciesen nuevas clases de superconductores. Incluso ahora, con más de 12.000 materiales superconductores catalogados y caracteri-

FUENTE: «SYNTHESIS AND STABILITY OF LANTHANUM SUPERHYDRIDES», POR ZACHARY M. GEBALLE ET AL., EN *ANGEWANDTE CHEMIE INTERNATIONAL EDITION*, VOL. 57, N.º 3; 15 DE ENERO DE 2018 (*estructura del hidruro de lantano*); JEN CHRISTIANSEN (*ilustración*)

zados, cabe preguntarse si aún quedan principios de diseño útiles ocultos en los datos.

Los algoritmos de aprendizaje automático son programas informáticos que se modifican a sí mismos a medida que reciben más información. El año pasado uno de esos algoritmos, entrenado con una base de datos de miles de materiales, desarrolló la capacidad de identificar superconductores (convencionales y no convencionales) en otro conjunto de datos con una precisión del 92 por ciento, así como de calcular sus temperaturas críticas. Más aún, lo logró usando tan solo propiedades elementales, como el peso atómico y la temperatura de fusión. «No se trata solo de que un algoritmo de aprendizaje automático sea capaz de hacerlo», incide el autor principal del trabajo, Valentin Stanev, de la Universidad de Maryland. «Lo interesante es cómo lo hace, qué predictores utiliza.»

De acuerdo con Stanev, el principio de diseño más importante que encontró el algoritmo con relación a la temperatura crítica de los cupratos es un parámetro (relacionado con el número de electrones en las capas exteriores de los átomos del compuesto) en el que aparentemente nadie había reparado antes. Se espera que, a medida que se identifiquen más predictores, puedan aplicarse de manera conjunta para acelerar la búsqueda de nuevos y mejores superconductores.

Stefano Curtarolo, colaborador de Stanev y científico de materiales en la Universidad Duke, apunta que en el futuro ya no habrá que confiar en la suerte: «El aprendizaje automático nos indicará qué subconjunto de compuestos estudiar. Los experimentales, en vez de dedicar un año a analizar 10 compuestos en el laboratorio, podrán comprobar 10.000 en el ordenador en tan solo unas pocas semanas».

UNA SUERTE DE ALQUIMIA

Aunque los teóricos han comenzado a predecir nuevos e interesantes compuestos, todavía están muy lejos de dar instrucciones detalladas sobre cómo producirlos en el laboratorio. Somayazulu describe así el proceso de síntesis de materiales: «Haces algo y funciona. Así que sigues haciendo exactamente lo mismo para que funcione, pero no tienes ni idea de por qué lo haces». Como ejemplo, su equipo tardó seis meses en repetir la comprobación de la superconductividad del LaH_{10} porque los investigadores aún estaban corrigiendo problemas en el protocolo para producir el compuesto. Pero al menos fueron capaces de crear el LaH_{10}, cosa que no ha ocurrido con el CaH_6, un material que Ma predijo en 2012 pero que aún no ha podido sintetizarse.

En cuanto al itrio, es mejor no mencionárselo a Somayazulu. Se supone que el hidruro de itrio (YH_{10}) es superconductor a temperaturas incluso mayores que el LaH_{10}, pero su comportamiento en los experimentos de Somayazulu fue «horrible». El truco del borazano no sirve para este material, y con el selenio funciona solo a bajas presiones. Y recordemos que Eremets se topó con el H_3S cuando buscaba H_2S. Está claro que la síntesis de materiales aún se parece bastante a la alquimia.

Entretanto, la búsqueda de estructuras conlleva sus propias dificultades. «Para usar los algoritmos solo hay que apretar un botón», aclara Zurek. «Pero el análisis puede ser delicado, y yo no querría que lo hiciese alguien que no fuera un experto», añade riendo. Un superordenador puede tardar alrededor de una semana en completar la búsqueda para una estequiometría y presión determinadas, y puede haber muchas combinaciones interesantes para cada par de elementos. La alta carga de cálculo, junto con lo peliagudo del análisis, restringe la mayoría de las búsquedas a compuestos formados por dos elementos y sin demasiados átomos en la celda unidad (el componente básico de una red cristalina). «Todavía no podemos predecir de manera fiable un sistema con tres elementos y 50 átomos en la celda unidad», lamenta Zurek.

Los programas de aprendizaje automático no son tan exigentes desde el punto de vista computacional: Stanev ejecutó el suyo en un ordenador portátil. Su gran limitación, y en general la de los principios de diseño, es que solo pueden aprender a partir de superconductores conocidos, por lo que no parece probable que lleven a descubrir clases completamente nuevas.

En cuanto al probable legado del LaH_{10} y los otros hidruros, hay diversas opiniones. Hemley, que hace poco se trasladó a la Universidad de Illinois en Chicago, espera que ayuden a crear un material «análogo» capaz de mantener la superconductividad de alta temperatura a presión ambiente. Littlewood no ve razones para que esto no sea posible. Sin embargo, otros son escépticos por el papel central que ha tenido hasta ahora la presión en el comportamiento de los hidruros. «Si puede existir un acoplamiento fuerte entre electrones y fonones sin que se haga añicos el cristal», apunta Mazin, «es precisamente porque la presión externa lo mantiene unido».

Si existe tal material análogo, probablemente tenga al menos tres elementos, afirma Zurek, y una estructura cristalina compleja, agrega Mazin. En términos generales, parece que, a medida que sube la temperatura crítica, los materiales van siendo cada vez más intrincados. Los superconductores de un solo elemento con temperaturas críticas de un solo dígito fueron superados por las aleaciones metálicas de Matthias, que, a su vez, se vieron rebasadas por compuestos con más elementos y estructuras cristalinas más complejas. Si, como creen muchos expertos, la gran esperanza de alcanzar el sueño de la temperatura ambiente reside en una clase todavía desconocida de superconductores, parece probable que se halle en lo más profundo del universo de posibilidades que ofrece la tabla periódica.

Por su parte, Somayazulu está satisfecho de haber abandonado la regla de Matthias contra los teóricos. En Argonne hablaba apasionadamente sobre los intentos fallidos de obtener el CaH_6, de su lucha por conseguir sintetizarlo y de los debates que mantuvo con los teóricos. En ocasiones fueron ellos quienes les enseñaron algo a los experimentales. Otras veces fue al revés. Para Somayazulu, ese ha sido el principal legado de los hidruros: la nueva «realimentación» entre teoría y experimento. «Cada vez que nuestros colegas teóricos hacen una predicción, hay un 50 por ciento de posibilidades de que funcione», concluye. «Pero ahora al menos tenemos ese 50 por ciento.»

PARA SABER MÁS

Pushing towards room-temperature superconductivity. Eva Zurek en *Physics*, vol. 12, art. 1, enero de 2019.
Evidence for superconductivity above 260 K in lanthanum superhydride at megabar pressures. Maddury Somayazulu et al. en *Physical Review Letters*, vol. 122, n.º 2, art. 027001, enero de 2019.
Superconductivity at 250 K in lanthanum hydride under high pressures. A. P. Drozdov et al. en *Nature*, vol. 569, págs. 528-531, mayo de 2019.

EN NUESTRO ARCHIVO

Semiconductores y superconductores. VV.AA., colección *Temas* de *IyC*, n.º 34, 2003.
El diboruro de magnesio, superconductor a alta temperatura. Paul C. Canfield y Sergey L. Bud'ko en *IyC*, junio de 2005.
Claves de la superconductividad a altas temperaturas. Graham P. Collins en *IyC*, octubre de 2009.
Superconductividad en el grafeno. Elizabeth Gibney en *IyC*, mayo de 2019.

ROMBICUBOCTAEDRO dibujado por Leonardo para *De divina proportione,* obra del matemático Luca Pacioli concluida en 1498 y dedicada al número áureo. La colaboración con Pacioli acabaría ejerciendo una notable influencia en la obra de Leonardo.



HISTORIA DE LA CIENCIA

El pensamiento matemático de Leonardo da Vinci

Al buscar en las matemáticas un lenguaje para plasmar la realidad, el polímata renacentista se adelantó casi cien años al método científico y a las ideas de Galileo

Pedro J. Miana

Pedro J. Miana es profesor en el Departamento de Matemáticas de la Universidad de Zaragoza y subdirector del Instituto Universitario de Investigación en Matemáticas y Aplicaciones, de la misma universidad. Sus líneas de investigación incluyen el análisis funcional, el análisis real y el análisis complejo.



El 2 de mayo de 1519, hace ahora 500 años, fallecía a los 67 años de edad en el castillo de Clos-Lucé, en Francia, el genio italiano Leonardo di ser Piero da Vinci, hijo ilegítimo y genio universal. En el que se cree su último dibujo ilustraba cuatro triángulos rectángulos de diferentes longitudes, y en una tabla adjunta intentaba descifrar la fórmula por la cual el área permanecería fija al variar el tamaño de los lados. Ese interés, casi obsesión, por la geometría y las matemáticas supone una referencia constante a lo largo de toda la vida de Leonardo. Y en él posiblemente subyace, de forma oculta, la grandiosidad de su legado.

Sin embargo, el reconocimiento a las aportaciones matemáticas de Da Vinci no ha sido unánime entre los expertos. El historiador de la matemática Carl Boyer (1906-1976) escribió:

> *A menudo se suele considerar a Leonardo como un matemático, pero su mente inquieta no podía concentrarse en la aritmética, el álgebra o la geometría el tiempo suficiente para lograr una contribución importante. [...] Pocas materias hay que dependan tanto como la matemática de una tradición continuada en los libros y de una larga concentración y meditación, y Leonardo no era precisamente un hombre dispuesto a mantener la concentración de una investigación de biblioteca, y ni siquiera de perseguir sus imaginativas ideas hasta sus conclusiones.*

El matemático húngaro István Fenyő (1917-1987), en cambio, perfilaba una imagen muy distinta del italiano:

> *Leonardo no solo era un aficionado entusiasta, sino que tenía también un excelente talento matemático. Su nivel de conocimientos matemáticos, especialmente después de sus estudios sistemáticos con Luca Pacioli, era parejo al de los matemáticos de su tiempo y exhibía una originalidad inusual.*

Aunque Leonardo nunca recibió una educación formal en matemáticas y tampoco dominaba técnicas como el álgebra, sí que contaba con un profundo sentido geométrico. Su legado refleja un profundo interés por numerosos problemas matemáticos, llegando en ocasiones a obsesionarse con algunos de ellos, como ocurriría con la cuadratura del círculo.

En el quingentésimo aniversario de su muerte, merece la pena repasar algunas de las contribuciones artísticas y científicas más importantes del genio florentino y centrarse en su contenido matemático. Como veremos, en su obra pueden encontrarse algunos elementos que ya se adelantaban más de cien años al método científico y a las ideas de Galileo Galilei sobre el papel de las matemáticas en la naturaleza, plasmadas en 1623 en *El ensayador*:

> *La filosofía está escrita en ese vasto libro que tenemos abierto ante los ojos (me refiero al universo). Pero este no*

EN SÍNTESIS

Aunque Leonardo da Vinci no destacó como un gran matemático, en su obra puede reconocerse un profundo interés por las matemáticas y por la geometría. Dicho apego se retrotrae a los años formativos de su juventud.

Leonardo nunca recibió una educación formal en matemáticas y jamás llegó a dominar el álgebra. Sin embargo, sí gozaba de una notable intuición espacial y geométrica. Esta se halla presente en múltiples aspectos de su obra.

En ese interés de Leonardo por las matemáticas pueden reconocerse elementos precursores del método científico, del cálculo infinitesimal y de la noción de las matemáticas como lenguaje indispensable para entender la naturaleza.

puede entenderse si antes no se aprende su lengua y los caracteres en los que está escrito. Está escrito en lengua matemática, y sus caracteres son triángulos, círculos y otras figuras geométricas, sin las cuales es imposible entender ni una palabra; sin ellas es como girar vanamente en un oscuro laberinto.

APRENDIZ DE VERROCCHIO Y DE LA NATURALEZA

El joven Leonardo era un gran observador de la fisonomía, fauna y flora del paisaje toscano, que a menudo plasmaba en extraordinarios bocetos que completaba con textos escritos en forma especular (una práctica habitual en él, consistente en escribir tal y como se vería una caligrafía ordinaria reflejada en un espejo). Recibió una educación elemental que en *Las vidas de los excelentes pintores, escultores y arquitectos* (1550), de Giorgio Vasari, se describe de la siguiente manera:

Hubiera obtenido grandes beneficios de sus estudios de ciencias y letras si no hubiese sido caprichoso y voluble, pues comenzaba a estudiar múltiples cosas y luego las abandonaba. Así, en aritmética, durante los pocos meses que la estudió, consiguió tales progresos que a menudo confundía a su maestro, suscitándole continuamente dudas y dificultades.

En 1467, contando quince años y por mediación de su padre, entró a trabajar en el taller de Andrea del Verrocchio, pintor y escultor florentino que ya gozaba de cierto renombre.

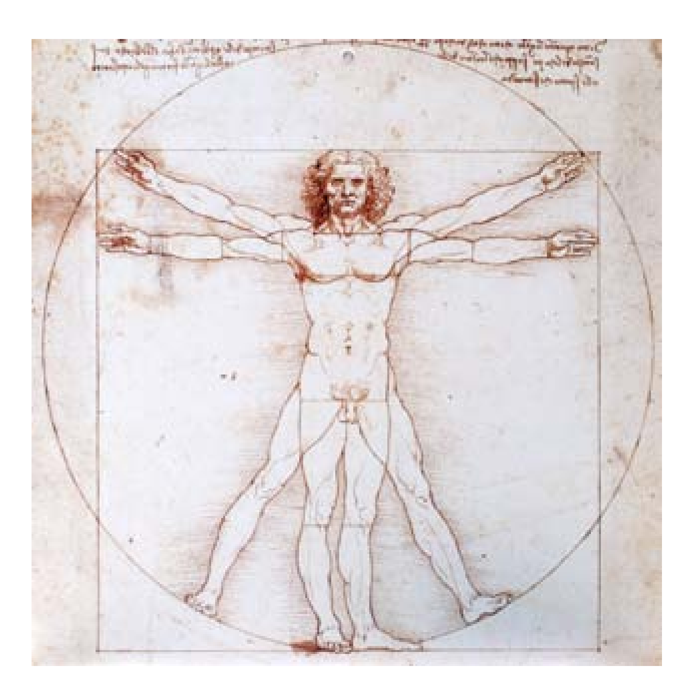
Verrocchio era un artista ecléctico, orfebre de formación, con quien Leonardo aprendió varias técnicas de dibujo, pintura y escultura, así como bases de química, ingeniería, mecánica y, por supuesto, perspectiva y geometría, campo en el que Verrocchio había trabajado en su juventud. La decoración geométrica realizada por el maestro para el sepulcro de Cosme de Médici sentaría un precedente para alguno de los diseños posteriores de Leonardo.

Un año más tarde, el taller de Verrocchio recibió el encargo de fabricar la esfera de bronce que culminaría la cúpula de la catedral florentina de Santa María de la Flor, diseñada por Filippo Brunelleschi. La fundición de la esfera, de 2,30 metros de diámetro y casi dos toneladas de peso, así como su transporte y posterior montaje a más de cien metros de altura despertaron la curiosidad del joven Leonardo por la mecánica, la arquitectura y el diseño de máquinas. Los cálculos necesarios para llevar a cabo el encargo se apoyaron en los realizados por el propio Brunelleschi, quien destacaba por su rigor matemático, para el diseño de la cúpula. Tras esta formación inicial, Leonardo abandonó el taller de Verrocchio en 1478, cuando contaba 26 años de edad.

LA ARMONÍA DEL MUNDO: EL *HOMBRE DE VITRUVIO*

En la primavera de 1482 se instaló en Milán. Aunque llegó con poco equipaje y sin ningún libro, ocho años después ya contaba con 35 volúmenes y diez años más tarde la cifra sobrepasaba los dos centenares. La invención de la imprenta en 1440 había democratizado el acceso a los textos, y Da Vinci superó la falta de una educación superior con el estudio de obras clásicas, en particular sobre matemáticas.

Fue precisamente por aquella época cuando comenzaron a aparecer las primeras obras impresas dedicadas a esta disciplina. El libro impreso de matemáticas más antiguo del que se tiene constancia es la *Aritmética de Treviso*, también conocida como *Arte dell'abbaco*. Obra anónima, fue publicada en 1478 en la localidad italiana que le da nombre. Cuatro años más tarde, el taller de Erhard Ratdolt, en Venecia, imprimía *Los elementos* de Euclides.



EL *HOMBRE DE VITRUVIO*, dibujado por Leonardo en 1490 en uno de sus diarios, resuelve el reto renacentista de inscribir una figura humana simultáneamente en un cuadrado y en una circunferencia sin distorsionar sus proporciones.

GETTY IMAGES/EDNAM/ISTOCK

De architectura, del arquitecto romano del siglo I a.C. Marco Vitruvio, se publicó en 1486. Consta de diez libros sobre magnitudes, materiales, decoración, hidráulica, mecánica, máquinas y artefactos bélicos. Este tratado, el más antiguo conservado de la disciplina, daría nombre a una de las obras más famosas de Leonardo. En el primer capítulo del tercer libro se comenta:

Es imposible que un templo posea una correcta disposición si carece de simetría y proporción, como la que exhiben los miembros y partes del cuerpo de un hombre bien formado.

Y a continuación se describen las proporciones que deben regir cada una de las partes principales de ese hombre:

Desde la barbilla hasta la parte más alta de la frente, donde están las raíces del pelo, mida una décima parte de la altura total.

En 1490, Leonardo corrige algunas de estas proporciones e ilustra el modelo en una hoja de 34,6 por 22,5 centímetros de uno de sus diarios. Su dibujo resuelve el reto renacentista de inscribir una figura humana simultáneamente en un cuadrado y en una circunferencia sin distorsionar sus proporciones, tomando como precedente el trabajo de su amigo Giacomo Andrea.

En la obra de Leonardo, el hombre inscrito en el cuadrado, cuyo centro se sitúa en los genitales, representa su aspecto terrenal. Sus brazos en cruz recuerdan vagamente a un Cristo cruci-



EL *RETRATO DE LUCA PACIOLI* (ca. 1495), atribuido a Jacobo de Barbari, ha sido profusamente estudiado por la variedad de elementos matemáticos que contiene. La excepcional ejecución del rombicuboctaedro que aparece en la parte superior izquierda ha llevado a sugerir que la mano de Leonardo estuvo detrás.

ficado. El hombre de la circunferencia, cuyo centro se halla en el ombligo, simboliza la dimensión espiritual. Cada figura es un microcosmos, un reflejo en miniatura del universo. El *Hombre de Vitruvio* constituye así la expresión pura del Renacimiento: una figura en movimiento y segura de sí misma, cuyo rostro algunos autores han considerado un autorretrato del propio Leonardo a sus 38 años y en la plenitud de sus condiciones.

El gran sueño de Leonardo era escribir una gran colección de libros que transmitieran sus conocimientos y su visión del mundo. Como anota en algunos de sus manuscritos, semejante colección constaría de tratados sobre pintura, anatomía, aritmética, geometría y astronomía, entre otras disciplinas. Y de nuevo queda patente la importancia que daba Da Vinci al estudio y al conocimiento, en particular al de las matemáticas.

COLABORACIÓN CON LUCA PACIOLI

Está bien documentado el encuentro en 1497 en la corte de Ludovico Sforza, duque de Milán, entre el monje franciscano Luca Pacioli y Leonardo a sus 45 años. Tres años antes, Pacioli había publicado la obra *Summa de arithmetica, geometria, proportioni e proportionalità*, considerada la primera enciclopedia de matemática pura y aplicada. Contiene el capítulo *De computis et scripturis*, el cual se tiene por el origen de la contabilidad moderna por partida doble, conocido en aquella época como método italiano o veneciano. La compra (y el precio) de *Summa de arithmetica* por Leonardo queda recogida en el *Códice atlántico*, una colección de textos y dibujos de Da Vinci conservada en la Biblioteca Ambrosiana de Milán, así como en el listado de los 114 títulos que conformaban la biblioteca propia del artista y que se incluye en el *Códice Madrid II*, descubierto en 1967 en la Biblioteca Nacional de España.

Sin ser un creador matemático, Pacioli era un excelente profesor y un entusiasta de su oficio. La colaboración y amistad entre los dos genios dio como resultado que Leonardo dibujara con suma delicadeza las 60 ilustraciones de los sólidos regulares en perspectiva para la siguiente obra de Pacioli, *De divina proportione*, finalizada en 1498 y publicada en 1509. En ella se presenta la razón áurea, tanto desde una perspectiva teórica como en relación con sus aplicaciones a varias obras de arte. Esta proporción, conocida desde la Antigüedad, rige a menudo los cánones de belleza de algunas obras excepcionales, como puede apreciarse en la fachada del Partenón de Atenas. Leonardo, que ya conocía el número áureo, lo empleó en algunas de sus obras más famosas, como *La dama del armiño* (1490), el mencionado *Hombre de Vitruvio* o la *Gioconda* (1517).

Es posible que *De divina proportione* no fuese la única colaboración entre Da Vinci y Pacioli. El franciscano era un experto jugador de ajedrez, y hacia 1500 escribió un tratado sobre el juego titulado *De ludo scachorum*, también conocido como *Schifanoia*. El manuscrito, sin firmar, de 48 páginas y dedicado a la marquesa de Mantua, Isabel de Este, nunca llegó a publicarse. Estuvo perdido cinco siglos hasta que fue redescubierto en 2006 en la biblioteca de 22.000 volúmenes del palacio Coronini Cronberg, en la ciudad italiana de Gorizia. Según los expertos, las ilustraciones iniciales presentan una calidad superior a la del resto. En particular, el diseño de la pieza de la reina recuerda al de una fuente dibujada por Leonardo en el *Códice atlántico*, lo que ha llevado a especular con la posibilidad de que Da Vinci fuese el autor de las primeras ilustraciones de la obra.

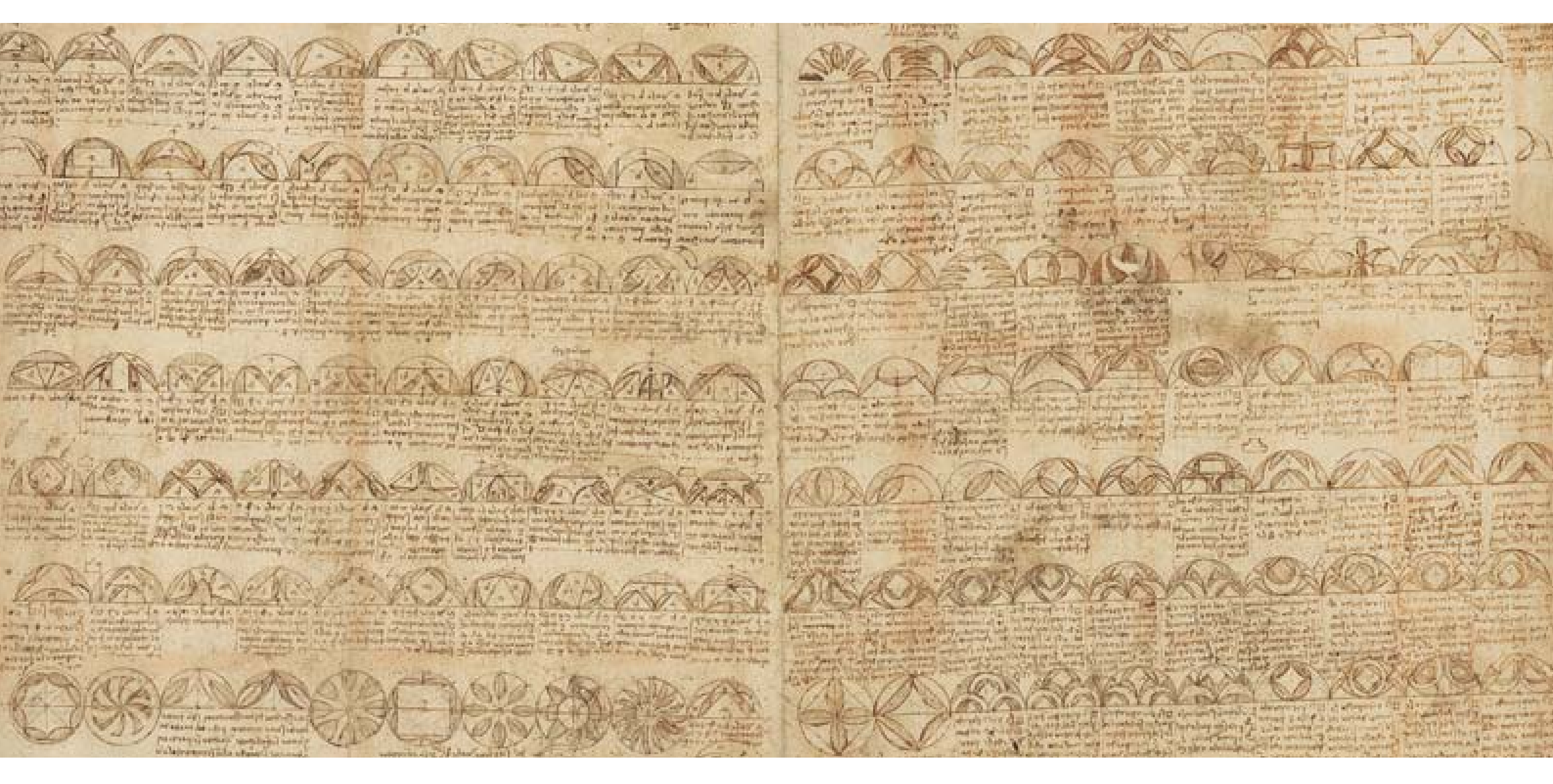
El *Retrato del fraile Luca Pacioli con un discípulo*, pintado en torno a 1495 y atribuido a Jacobo de Barbari, ha sido profusamente estudiado debido a la gran cantidad de elementos matemáticos que contiene. Colgando del techo sobresale un recipiente medio lleno de agua que resulta ser un rombicuboctaedro, un sólido de 26 caras (18 cuadrados y 8 triángulos equiláteros). La gran calidad de su factura, sobre todo en comparación con otras partes del cuadro, ha llevado a sugerir que la mano izquierda de Leonardo estuvo detrás. También se ha conjeturado que el joven que aparece tras el maestro podría ser un Leonardo rejuvenecido, aunque otra posibilidad es que se trate de Guidobaldo de Montefeltro, mecenas de Pacioli y a quien estaba dedicada la *Summa*.

Fray Luca Pacioli colaboraba con Leonardo en los entretenimientos de la corte milanesa. Esos juegos y diversiones les llevaron a cultivar una amistad que también se alimentó de las lecciones de matemáticas. En sus manuscritos, Da Vinci copiaba textos de Pacioli cuando un pasaje le parecía especialmente difícil o interesante.

DIBUJOS PARA PROBLEMAS IMPOSIBLES

Una de las cuestiones de especial interés para Leonardo eran las distintas maneras en que podía alterarse la forma de un objeto manteniendo constante su volumen. Como científico y artista, tenía una gran visión espacial y geométrica, y se ha llegado a decir que incluso «pensaba en imágenes». Pero la geometría parecía ser su única herramienta para resolver problemas matemáticos. Existen dudas sobre su capacidad para la aritmética; en el *Códice Madrid I*, por ejemplo, consta un error en el cálculo de 2^{13} en una tabla de potencias de 2 (pág. f75r/148). Da Vinci desconocía casi por completo las tendencias dominantes de la matemática de la época y en particular el álgebra, lo que le impedía plantear y resolver problemas en ese potente lenguaje.

Los textos clásicos le proporcionaron problemas que se habían resistido durante siglos. Así ocurrió con la «duplicación del



LÚNULAS (superficies delimitadas por dos arcos de circunferencia) dibujadas por Leonardo en el *Códice atlántico*. En una estrategia que puede considerarse precursora del cálculo infinitesimal, el italiano pensaba que el problema de la cuadratura del círculo podría resolverse descomponiendo un círculo inicial en lúnulas cada vez menores.

cubo», un problema surgido en el siglo V a.C. en la ciudad griega de Delos. Según la leyenda, la peste que asolaba la población se detendría cuando se duplicara el volumen del altar dedicado al dios Apolo. Dicho problema requería construir un nuevo cubo cuya arista tuviese una longitud igual a la original multiplicada por $\sqrt[3]{2}$. Es aquí donde reside la dificultad, ya que el valor de $\sqrt[3]{2}$ no puede determinarse con regla y compás. Sin embargo, tal y como puede consultarse en el *Códice atlántico*, Leonardo halló una solución visual basada en la construcción de un cubo sobre un plano que atraviesa diagonalmente el cubo original.

Sin duda, el problema más célebre al que se enfrentó Leonardo fue la cuadratura del círculo: dado un círculo de radio unidad, construir un cuadrado de igual área sin usar más que regla y compás. En este caso, lo que se pide es identificar por medios geométricos el valor de $\sqrt{\pi}$.

La primera referencia al problema se encuentra ligada al filósofo griego Anaxágoras, quien, condenado en Atenas por afirmar que el Sol no era un dios sino una enorme piedra al rojo vivo, se entretenía durante su condena intentando cuadrar el círculo. En 1882, el matemático alemán Ferdinand von Lindemann demostró que el problema no tiene solución dado que π es un número trascendente; es decir, que no puede expresarse como solución de una ecuación algebraica con coeficientes enteros. Sin embargo, la sencillez y la belleza del planteamiento atrajeron a Leonardo, quien lo trabajó de forma obsesiva en sus manuscritos.

Siguiendo la tradición griega, Da Vinci estudió las formas geométricas de las lúnulas: espacios cerrados delimitados por dos arcos de circunferencia. En el siglo V a.C., Hipócrates de Quíos fue el primero en demostrar que algunas de estas figuras sí podían cuadrarse; es decir, que era posible dibujar cuadrados de idéntica área. Ello condujo a pensar que el problema de la cuadratura del círculo tenía solución y que, para encontrarla, bastaba con descomponer un círculo en las lúnulas adecuadas. Leonardo siguió este camino y lo trabajó en múltiples direcciones. Llegó incluso a explorar la posibilidad de descomponer una figura inicial en otras cada vez menores, una estrategia que puede considerarse precursora del cálculo infinitesimal que en el siglo XVII concebirían Newton y Leibniz.

Leonardo creyó por unas horas que había resuelto el problema. En el *Códice Madrid II* (pág. f112r/236) puede leerse:

> *En la noche de san Andrés encontré la solución final de la cuadratura del círculo, cuando ya se terminaba la vela, la noche y el papel en el que escribía, al filo del amanecer.*

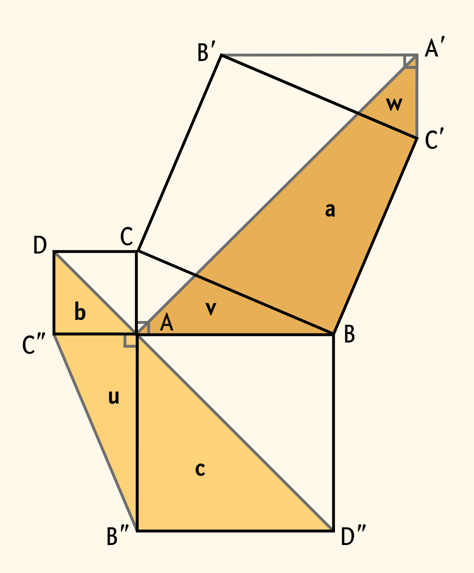
Sus numerosos intentos de resolver el problema le llevaron a dibujar decenas de bellas representaciones geométricas en las que igualaba el área de diferentes regiones limitadas por líneas rectas y curvas. Como comenta en el *Códice atlántico*, se propuso publicar un tratado titulado *De ludo geometrico* con los resultados parciales obtenidos. Tuvo el mismo destino que otros muchos de sus textos, pero el manuscrito revela a un hombre absorto en el apasionante juego mental del problema y convencido de que los secretos de la geometría podían aplicarse a los misterios de la naturaleza. En una carta fechada en 1501 y dirigida a Isabel de Este, se describe a Leonardo de la siguiente manera:

> *En definitiva, sus experimentos matemáticos le han distraído tanto de la pintura que ya no puede padecer más el pincel.*

ATRIBUIDO A LEONARDO

Demostración del teorema de Pitágoras

En 1906, el historiador de la matemática Max Simon atribuyó a Da Vinci la siguiente demostración gráfica del teorema de Pitágoras. Aunque su autoría es todavía incierta, hoy sigue conociéndose como «demostración de Leonardo».



A partir del triángulo rectángulo *ABC* se construyen los triángulos *A′B′C′* y *AB′′C′′*, idénticos al original. Por construcción, los cuadriláteros *ABC′A′* y *D′′B′′C′′D* son iguales, al ser sus ángulos idénticos. Además, ambos cuadriláteros están compuestos por una superficie igual a la del triángulo original ($u = v + w$) y por otra superficie que, en ambos casos, deberá ser idéntica: $a = b + c$. Dado que las áreas *a*, *b* y *c* corresponden a la mitad de la superficie de cada uno de los cuadrados construidos sobre los lados del triángulo original, tenemos que $BC^2 = AC^2 + AB^2$.

HONORES FINALES

A la muerte de Leonardo, su discípulo Francesco Melzi heredó sus manuscritos. Hacia 1550 se publicó una colección de pensamientos, ideas y notas extraídas de ellos que, bajo el título *Tratado de pintura*, contiene la siguiente reflexión sobre la importancia de las matemáticas:

> *Ninguna investigación humana se puede probar verdadera ciencia si no pasa por las demostraciones matemáticas.*

En el *Códice Windsor*, custodiado en el castillo homónimo, escribe al lado de una imagen anatómica la máxima:

> *Que no me lea quien no sea matemático, pues yo lo soy siempre en mis principios.*

Y en el *Códice E*, conservado en la Biblioteca del Instituto de Francia en París, afirma:

> *La mecánica es el paraíso de las ciencias matemáticas, porque gracias a ella se alcanzan los frutos de las matemáticas.*

Estas reflexiones muestran el papel central que Leonardo otorgaba a esta disciplina. Y, de hecho, las matemáticas y la computación también proporcionaron reconocimiento a Leonardo. En 1906, el historiador de la matemática Max Simon atribuyó a Da Vinci una demostración gráfica del teorema de Pitágoras. Dicha demostración aparece por primera vez en el libro de Georg Friedrich von Tempelhoff *Geometria para soldados y para aquellos que no lo son*, de 1790, donde sin embargo no consta ninguna atribución. La autoría de Leonardo también ha sido defendida por el estadounidense Elisha Scott Loomis en *The Pythagorean proposition*, de 1928. Aunque no existen pruebas concluyentes, hoy en día se sigue conociendo como «demostración de Leonardo».

Por otro lado, una de las ilustraciones del *Códice Madrid I* (pág. f36v/87) ha sido interpretada como una versión primitiva de una calculadora mecánica. En ella aparecen 13 ruedas dentadas y enlazadas para producir una trasmisión del movimiento de una parte a otra. Aunque no todos los investigadores compartan que este diseño corresponda a una calculadora, en 1968, un año después del descubrimiento de los *Códices Madrid* en la Biblioteca Nacional, el ingeniero y experto en las máquinas de Leonardo Roberto A. Guatelli construyó, con el apoyo de IBM, una réplica del ingenio. Y el *criptex*, una especie de caja fuerte para documentos que se abre al acertar la combinación adecuada de letras y números, también se atribuye al genio florentino, aunque su verdadera autoría sigue sin confirmarse.

Leonardo superó su falta de educación académica reglada con una curiosidad insaciable, una capacidad de observación sin igual y una experimentación constante, amén del apoyo de los textos clásicos. En cierto modo, con su afán por entender las matemáticas para plasmar la realidad en sus obras, este genio se adelantó un siglo al método científico de Galileo, y es muy probable que también él hubiese suscrito la célebre frase «las matemáticas son el lenguaje con el que Dios ha escrito el universo».

Su encuentro con Pacioli le introdujo en problemas matemáticos de gran dificultad a los que se enfrentó con su excelente visión geométrica, su técnica artística y su capacidad de experimentación. Sin embargo, estas no eran las herramientas adecuadas para solucionarlos. Aunque los resultados alcanzados no permiten distinguirlo como un gran matemático, su intuición, interés —por no decir obsesión— y su visión de la aplicabilidad de las matemáticas lo destacan como uno de los precursores de la explosión que viviría esta disciplina en los siglos posteriores. IyC

PARA SABER MÁS

Leonardo da Vinci's elements of the science of man. Kenneth D. Keele. Academic Press, 1983.
Historia de la matemática. Carl B. Boyer. Alianza Editorial, 1999.
Leonardo e la matematica. Giorgio T. Bagni y Bruno D'Amore. Giunti Editore, 2006.
Leonardo da Vinci: La biografía. Walter Isaacson. Debate, 2018.
Códices Madrid I y II. Pueden consultarse en línea en **leonardo.bne.es/index.html** (*las referencias en el texto permiten identificar las páginas correspondientes*).

EN NUESTRO ARCHIVO

Contribución de Leonardo a la mecánica teórica. Vernard Foley y Werner Soedel en *IyC*, noviembre de 1986.
El retrato de Luca Pacioli. Bartolo Luque en *IyC*, diciembre de 2014.

por Sean Bailly

El impacto de un meteorito

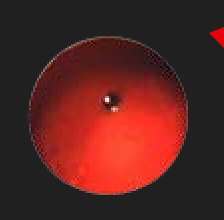
Se reproducen en el laboratorio las huellas que dejan proyectiles de distintas formas

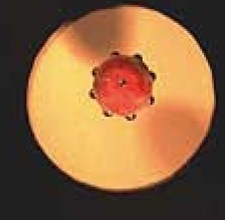
El cráter lunar Copérnico presenta huellas radiales de material eyectado que se extienden hasta 800 kilómetros más allá del punto de impacto. Estas marcas se observan en numerosos cráteres de la Luna, pero también de Marte, y se forman en el momento de la colisión. Sin embargo, los experimentos de laboratorio que simulan estos impactos no crean estructuras radiales. Felipe Pacheco-Vázquez, de la Universidad Autónoma de Puebla, en México, ha demostrado que se necesitan proyectiles no esféricos para reproducir estas estructuras.

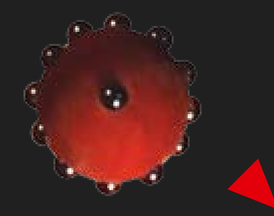
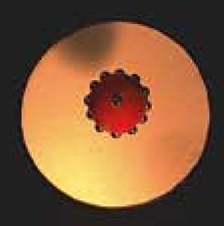
Cuando un proyectil esférico choca de frente contra una superficie plana, levanta una capa de material eyectado perfectamente simétrica que se deposita alrededor del cráter sin

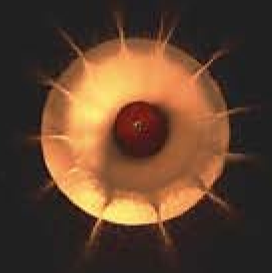
TRES TIPOS DE COLISIONES: Imágenes sucesivas, a lo largo de 0,4 segundos, de tres impactos de una canica provista, respectivamente, de 0, 8 y 12 protuberancias (*de arriba abajo*).





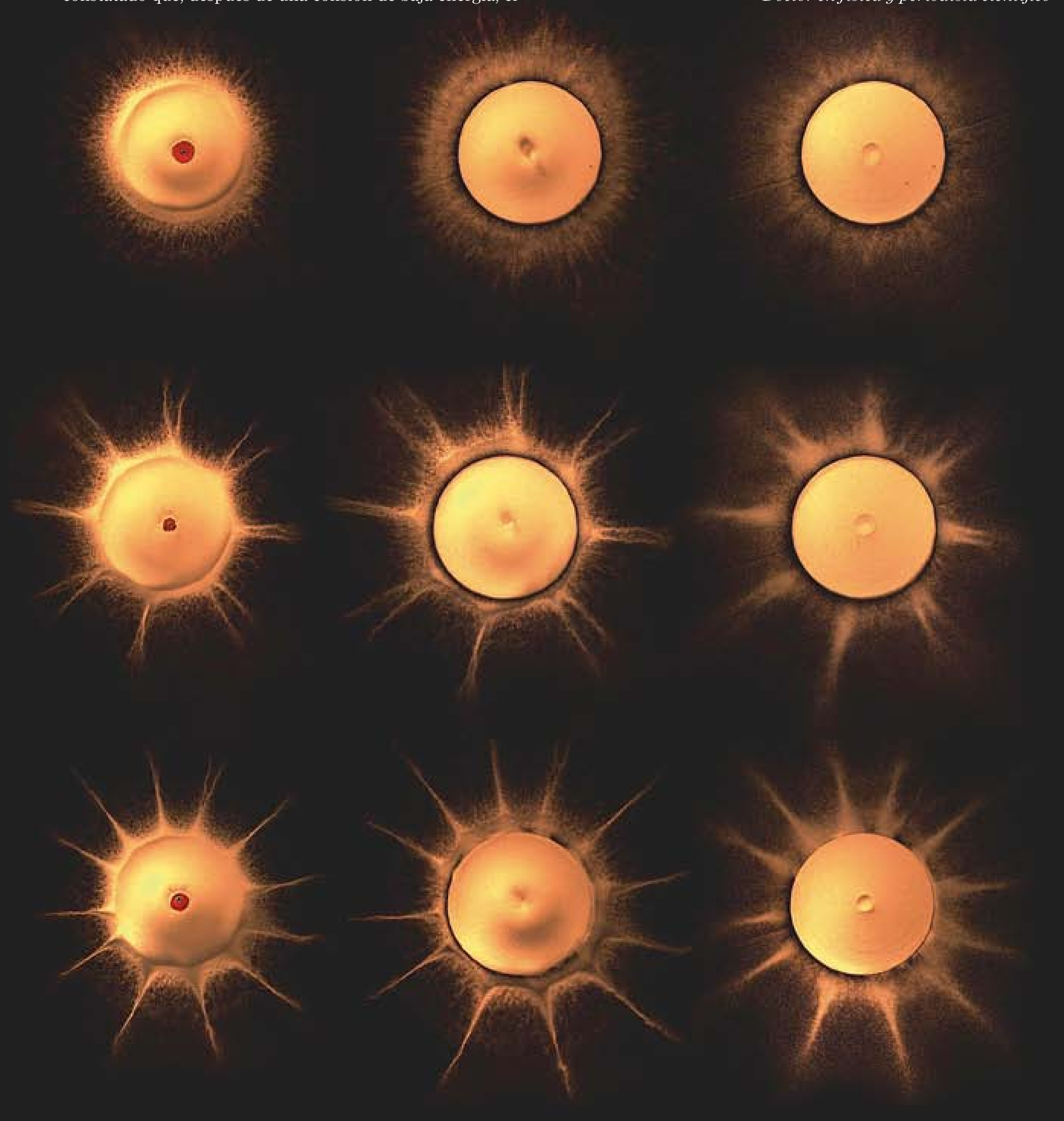






formar marcas radiales. En cambio, si la superficie del proyectil presenta curvaturas cóncavas en su interfaz con el suelo, focaliza el material eyectado y lo dirige en una dirección específica, lo que produce una estructura radial. Así, por ejemplo, al implantar cuatro protuberancias sobre una canica metálica recubriéndola con pasta de modelar, Pacheco ha obtenido ocho rayas de material eyectado después de un impacto sobre una superficie plana de arena. Y ha creado el mismo género de estructuras con proyectiles irregulares, que son más representativos de la forma de un meteorito.

Pacheco también ha estudiado la forma del cráter. Ha constatado que, después de una colisión de baja energía, el cráter conserva cierta traza de la forma del proyectil (un objeto triangular que impacta deja un cráter casi triangular). Pero al aumentar la energía, la forma del cráter tiende a ser más circular. Eso se explicaría por el hecho de que un impacto de alta energía penetra más profundamente en el suelo y facilita la redistribución del material que lo compone. En ese caso el cráter tiende a ser circular, que es su forma óptima. Tal resultado permite comprender por qué la mayoría de los cráteres de impacto en la Luna son de forma circular, aunque los meteoritos no son particularmente esféricos.

—Sean Bailly
Doctor en física y periodista científico



por Francisco Sáez de Adana

Francisco Sáez de Adana es catedrático del Departamento de Ciencias de la Computación y director del Instituto Franklin de la Universidad de Alcalá.



Los inicios del radar en España

Tecnología y autarquía en los primeros compases de la Guerra Fría

En 1996, un equipo de investigadores integrado por Roberto Moreno, Ana Romero y Fernando Redrajo catalogó los planos correspondientes a diferentes equipos del Instituto Nacional de Electrónica (INE) que se conservaban en el Instituto Torres Quevedo del Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC). Entre ellos se encontraban los de los prototipos de radar construidos en el INE entre 1952 y 1954, los primeros desarrollados en España. Para ello, el Patronato Juan de la Cierva del CSIC contrató a seis investigadores que habían trabajado en radares en Alemania durante la Segunda Guerra Mundial: Fritz Kallies, Erich Keller, Adolf-Echard Hoffman-Heyden, Richard Schaefer, Joseph Diels y Wilhelm Rupper.

No todos concluyeron su trabajo, bien porque regresaron a su país o porque se dedicaron a otras tareas dentro del grupo de microondas del INE. Así, solo participaron en todo el proceso de fabricación de los prototipos Keller y Schaefer, que pidieron al patronato que facilitase la incorporación de algunos de sus colaboradores, como Hans-Karl Fuchs, Fritz Wächter y Erich Meyer. También se incorporaron al equipo varios ingenieros españoles, entre ellos Rafael Domínguez, Felipe Jiménez, Juan Díaz, María de las Nieves Alfonso, Máximo Hernánz, Antonio de la Fuente, Manuel Navajas, Fructuoso Camps y Joaquín de las Doblas. Gracias al trabajo de este grupo, el INE se convirtió en un centro de primer orden mundial en radares y radiofrecuencia, especialmente en lo que se refiere al radar de navegación marítima. Ello permitió al régimen vender este éxito como uno de los logros más destacados de su política científica. Sin embargo, como se verá en este artículo, la intención inicial no fue incluir el radar, ni los equipos de comunicaciones en general, en la política autárquica del régimen, sino importar directamente estos equipos de otros países más avanzados.

La provisión de radares en Europa y Estados Unidos

El objeto principal de ese desarrollo era la navegación marítima civil. En condiciones meteorológicas adversas, los buques tenían que esperar la intervención de un práctico para entrar en puerto, lo que generaba retrasos y esperas. Los principales puertos europeos ya habían instalado equipos de radar, y algunos de los buques procedentes de otros países contaban asimismo con radares de navegación.

El Gobierno español intentó inicialmente adquirir equipos de este tipo a la compañía británica Marconi, a través de su filial española, de la que poseía el 50 por ciento de las acciones. Aprovechando la compra de equipos civiles se intentó también la provisión de equipos de uso militar. Sin embargo, en octubre de 1945 el Gobierno británico había decidido no suministrar a España ningún tipo de armamento o material de uso militar. A esta decisión se sumarían posteriormente Estados Unidos y Francia.

Ante esa situación, Marconi solicitó en julio de 1949 al Ministerio de Exteriores británico (Foreign Office) permiso para suministrar al Gobierno español equipos de radar de uso militar. La solicitud fue rechazada. Sin embargo, Marconi no había incluido en su petición seis localizadores Mark II, que fueron enviados en octubre de 1949 a la Marina española, debido a que estos equipos eran de uso civil y entraban dentro de los acuerdos comerciales entre los dos países.

Tres de los localizadores se instalaron en barcos de guerra españoles. Estos equipos eran similares a los que se usaban en los trasatlánticos como el *Queen Mary*. Aun sin tener un valor militar específico, en la práctica eran un activo considerable para cualquier navío de grandes dimensiones. El Gobierno francés solicitó en enero de 1950, a través de la embajada británica en París, la apertura de una investigación sobre la posible existencia de un contrato entre Marconi y el Gobierno español para la construcción en España de equipamiento radar. En realidad, el Gobierno francés recibía pre-



PROTOTIPO DE RADAR de navegación marítima, conservado en los pasillos del Instituto Torres Quevedo del CSIC.

CORTESÍA DEL AUTOR

siones de la industria de su país, ya que, como resultado del acuerdo previo entre los dos Estados, había rechazado algunas licencias de exportación a una empresa francesa que había sido invitada a suministrar equipamiento radar a España.

¿Uso militar o civil?

A raíz de esa protesta, el Foreign Office abrió una investigación que concluyó distinguiendo entre el radar destinado a uso militar y el radar destinado a usos civiles, como la navegación de costa. Ante esta respuesta, el Gobierno francés argumentó que, en la práctica, tal distinción era muy difícil, ya que un mismo equipo podía servir tanto para objetivos pacíficos como bélicos. Por ese motivo, solicitaba encontrar una solución que permitiera dar una respuesta a su industria. La única salida posible era alcanzar otro «pacto entre caballeros» con los fabricantes británicos (como Marconi) para que detuvieran el suministro a España si se demostraba que la Marina española era su destino final. En febrero de 1950, Marconi respondió negativamente a la petición, aduciendo que la firma holandesa Philips había ofrecido la provisión al Gobierno español de aparatos radar de defensa. Teniendo en cuenta que Holanda no participaba en el acuerdo de prohibición de suministro de material militar a España, Marconi se hallaba claramente en una posición de desventaja.

Ante las negativas de Marconi, durante algo más de un año los Gobiernos francés y británico intercambiaron opiniones al respecto sin llegar a un acuerdo. Ambos se veían presionados por sus respectivas industrias (la empresa francesa Radio Maritime tenía también acciones de la Marconi española). Además, los barcos británicos y franceses que llegaban a España se quejaban de la falta de equipamiento radar en sus puertos. El radar marítimo civil se proporcionaba de forma general a todos los barcos mercantes, y había sido recomendado por el Convenio Internacional para la Seguridad de la Vida en el Mar. La prohibición de suministro en España significaba que los barcos mercantes de otros países no podían obtener piezas de repuesto y servicio en los puertos españoles.

No fue hasta junio 1951, a propuesta de la embajada francesa, que se llegó a un principio de acuerdo. La fórmula sugerida por los franceses se basaba en dos puntos: por un lado, la exportación de material militar, es decir, de armamento propiamente dicho, continuaría prohibida; por otro, la exportación de material clasificado de uso militar o civil según su destino sería autorizada en la medida en que el uso civil fuera preponderante al militar.

Los británicos no aceptaron esa propuesta porque consideraron que podría aplicarse no solo a equipamiento radar, sino también a otros productos, como motores de aviones. Finalmente, Francia y Gran Bretaña llegaron a un acuerdo que abría la puerta a una solución satisfactoria a los intereses españoles. Sin embargo, en todo este proceso no se había tenido en cuenta a Estados Unidos, que ya estaba contemplando la posibilidad de suministrar armas a España. Una vez alcanzado el acuerdo, el Foreign Office informó a EE.UU. a través de su embajada en Londres.

Se trata de un ejemplo de aprovechamiento propagandístico de una situación adversa causada por la posición internacional de España

Para sorpresa de franceses y británicos, EE.UU. respondió que la exportación de cualquier tipo de radar estaba sujeta a la Orden de Control de Exportación de Bienes, según la cual las empresas debían consultar al organismo correspondiente sobre la exportación a Rusia, países satélites o a clientes que intentaran reutilizar el equipo. El radar marítimo civil entraba dentro de esta última categoría, por lo que su suministro debía ser controlado. Fue, por tanto, incluido en el primer punto de la fórmula conjunta que habían adoptado franceses y británicos, impidiendo que se suministraran, a partir de ese momento, otros equipos de navegación marítima más allá de los inicialmente suministrados. Pese a las supuestas amenazas de Philips, ninguna otra compañía proporcionó radares a España hasta la apertura propiciada por los pactos de 1953.

El desarrollo del radar en España

La creación de un equipo para el desarrollo de un radar y la contratación de ingenieros alemanes respondió, pues, a la imposibilidad de importar equipos extranjeros. Sin embargo, el régimen hizo de la necesidad virtud. En 1955, el radar de navegación marítima recibió el premio Francisco Franco de Investigación Técnica, creado específicamente para este proyecto, ya que hasta entonces se premiaban solo trabajos en las especialidades de ciencias y letras. Desde el principio, en las revistas especializadas de los distintos organismos científicos españoles el radar se difundió como un ejemplo de la capacidad nacional para acercarse tecnológicamente a los países más avanzados, constituyendo, de acuerdo a la propaganda de la época, una muestra positiva de la política autárquica del Gobierno español.

Aunque es cierto que los radares del equipo del INE estaban técnicamente cerca del estado del arte de la época, su desarrollo no correspondió a una política autárquica intencionada, sino a la imposibilidad de adquirir de otros países equipamiento con aplicaciones potencialmente militares. Se trata, por tanto, de un ejemplo de aprovechamiento propagandístico de una situación adversa causada por la posición internacional de España en los primeros años del franquismo. IyC

PARA SABER MÁS

El saber tecnológico en la política industrial del primer franquismo. Santiago Manuel López García (tesis doctoral). Universidad Complutense de Madrid, 1994.

Tracking the history of radar. Dirigido por O. Blumtritt, Hartmut Petzold y William Aspray. The IEEE Center for the History of Electrical Engineering, Nueva Jersey, 1994.

Recuperación del instrumental científico-histórico del CSIC. Roberto Moreno, Ana Romero y Fernando Redrajo. Centro de Tecnologías Físicas Leonardo Torres Quevedo, Madrid, 1996.

Autarquía a su pesar: La introducción del radar en España. F. Sáez de Adana en *De la Guerra Fría al calentamiento global. Estados Unidos, España y el nuevo orden científico mundial*. Dirigido por Lino Camprubí, Xavier Roqué y Francisco Sáez de Adana. Libros de la Catarata, Madrid, 2018.

EN NUESTRO ARCHIVO

¡Calla y calcula! David Kaiser en *IyC*, abril de 2014.

por Zeynep Tufekci

Zeynep Tufekci es profesora adjunta en la Escuela de Información y Biblioteconomía de la Universidad de Carolina del Norte y colaboradora habitual del *New York Times*.



¿Es seguro el voto telemático?

Los expertos no pueden garantizar la total seguridad de la votación electrónica

La votación telemática parece una idea factible. Al fin y cabo, ya realizamos numerosas tareas a través de Internet y transmitimos datos confidenciales encriptados, como historiales financieros o médicos. Existen métodos criptográficos, llamados de «verificabilidad de extremo a extremo», que prometen que los votos de los ciudadanos se registrarán según lo previsto; que todos los votos se contarán; y que el escrutinio final se corresponderá con la suma de todas las papeletas. Además, la comodidad del voto electrónico podría estimular una mayor participación.

¿Y qué lugar mejor que Suiza, donde la gente vota con frecuencia, para poner a prueba un sistema telemático? Allí el pueblo opina directamente sobre muchas decisiones trascendentales, lo que deriva en un gran número de votaciones. Solo en 2018 se celebraron 10 referéndums sobre temas muy diversos. Votar tan a menudo hace a los suizos aún más receptivos a la comodidad electoral que nosotros.

Aunque de forma limitada, en algunos cantones suizos ya se vota a través de Internet empleando dos sistemas certificados por separado. El Gobierno afirma que dos tercios de los ciudadanos con derecho a voto han elegido esta opción. Cuando no hace mucho el país decidió expandir drásticamente el sistema de votación electrónico, procedió de forma metódica. El primer paso consistió en celebrar un simulacro de referéndum e invitar a piratas informáticos de «sombrero blanco» (investigadores que destapan vulnerabilidades para que puedan resolverse) de todo el mundo a infiltrarse en el sistema, ofreciendo una recompensa de unos 150.000 dólares.

Los premios no tardaron en reclamarse. Tres equipos independientes mostraron que podían alterar los resultados de las votaciones sin ser detectados, el peor de los escenarios posibles. El fallo concierne al modo en que el sistema «baraja» los votos cifrados, antes del recuento, para proteger la privacidad de los usuarios. No se trata de algo irreparable, pero, aunque se solucione, ¿cómo va a convencerse a los votantes de que deben confiar en el nuevo procedimiento?

Ahí radica el principal defecto de todos los métodos de votación electrónica. Aquellos que no emplean criptografía no pueden garantizar dos aspectos cruciales: el secreto del voto y la verificación del escrutinio. Y aquellos que recurren a esquemas criptográficos necesitan la confianza de los usuarios. Estonia, un país en el que se vota por vía telemática desde 2005, constituye un ejemplo de esto último. Un equipo de investigadores de la Universidad de Oxford que estudió el sistema estonio en 2016 elogió muchos de sus protocolos de seguridad, pero señaló que, debido al tamaño reducido del país, los funcionarios cuentan con generar confianza en las personas que gestionan sus elecciones mediante las relaciones interpersonales. Parece que los estonios consideran que el modelo es suficientemente bueno, pero no resulta fácil de exportar.



Otra característica que distingue a Estonia es su sistema obligatorio de identidad digital: a cada ciudadano se le expide una tarjeta con claves criptográficas que se usan de manera generalizada en funciones del sector público y privado. Sin embargo, este modelo, aunque resuelve el problema de identificar a los votantes y elimina la multiplicidad de voto, da lugar a otro inconveniente: podría servir como un gigantesco sistema de seguimiento y vigilancia con el que otros países quizá no se sentirían cómodos.

Además, las identidades digitales quizás originen un tercer problema: en 2017 se descubrió una vulnerabilidad en el *hardware* de las tarjetas estonias que, en potencia, permitiría el robo de identidad, precisamente lo que la tarjeta debería evitar. Los funcionarios las reemplazaron rápidamente y actualizaron sus sistemas, pero la crisis solo consiguió sortearse porque el fallo no llegó a explotarse. La próxima vez quizá no se dé ese caso.

Al final, incluso el sistema telemático más seguro adolece de una debilidad esencial: el buen funcionamiento de una votación no debería depender de si la gente se fía de los expertos. Es cierto que los errores y el fraude pueden ocurrir sea cual sea el mecanismo electoral, pero el método electrónico reduce el umbral de sigilo y aumenta la magnitud de ellos. Las papeletas tradicionales pueden manipularse, pero se necesita que muchas personas se organicen para llevar a cabo una conspiración que resultaría difícil mantener en secreto. Y si se sospecha que ha existido fraude, puede efectuarse un recuento en presencia de observadores.

La confianza en los resultados electorales es lo que otorga legitimidad a cualquier Gobierno democrático. Los sistemas de votación telemática no pueden asegurar a los ciudadanos que no existan trampillas, puertas traseras, malas implementaciones o vulnerabilidades. Las democracias deberían centrarse no en el voto por Internet, sino en otras medidas que fomenten la participación, como declarar festivos los días de elecciones, aumentar el número de colegios electorales para reducir las colas, habilitar transportes para las personas que los necesiten, etcétera. Las elecciones son demasiado importantes para basarse en sistemas que dependan de la confianza en los expertos.

CHRISTINA CHUNG

por Pere Castells y Claudi Mans



Claudi Mans es catedrático emérito de ingeniería química de la Universidad de Barcelona y divulgador científico.

Pere Castells, experto en ciencia y cocina, es presidente del congreso mundial Science&Cooking.

Impregnaciones

La técnica del vacío revoluciona las maceraciones

Macerar consiste en dejar sumergido un producto alimentario en un líquido para que ambos interaccionen. Antiguamente se utilizaba como método de conservación. Se empleaban productos acuosos ácidos, destilados alcohólicos, aceites u otras grasas. Durante el proceso se producen intercambios de aromas y modificaciones en las texturas. De ahí que los cocineros hayan usado la técnica de la maceración para aromatizar líquidos y para saborizar o reblandecer sólidos.

En el plano gastronómico, esta operación recibe apelativos diversos y a veces con matices que solo conocen los profesionales. Así, se denominan salmueras cuando se trata de baños de agua con sal (aunque, en casos excepcionales, pueden contener azúcar). Se habla de escabeche cuando el baño contiene algún ácido, si bien también puede escabecharse con aumento de la temperatura. Los términos marinar y adobar se utilizan cuando se sumergen vegetales, pescados o carnes en una mezcla de aceite, sal, un ácido o un producto alcohólico y hierbas aromáticas. Incluso a veces se diferencia entre ambos: se marinan vegetales y pescados, mientras que se adoban carnes. En nuestra tradición culinaria es habitual adobar las carnes de caza con diferentes productos, incluidos los vinos, para darles sabor y, sobre todo, reblandecerlas.

Un caso especial corresponde al cebiche. Procedente de Latinoamérica, se trata de una maceración de pescado y/o marisco en un medio cítrico, con otros ingredientes, que varían según el país. De la mano de Gastón Acurio, ha sido la cocina peruana la que ha sacado más partido de esta elaboración. En los últimos años se han abierto cebicherías en todo el mundo (se calcula que se ha inaugurado una media de una por día), amplificando la moda de la cocina peruana. En esta elaboración se produce una desnaturalización de las proteínas del sólido debido al medio ácido —aún en frío—, junto con los correspondientes cambios de textura y aspecto.

La expansión de la cocina a baja temperatura (inferior a 100 ºC), denominada también *sous vide* («al vacío»), y la facilidad con que se han introducido en las cocinas los aparatos de extracción de aire para aplicar esta técnica han propiciado el desarrollo de otro método en paralelo a la maceración. Nos referimos a la impregnación (también llamada «efecto esponja» y, erróneamente, «osmotización»). Esta busca la penetración de un líquido en un sólido, que, evidentemente, debe ser poroso.



LA POROSIDAD del melón permite elaborar este *Mojito sólido*.

CORTESÍA DE VÍCTOR QUINTILLÁ, RESTAURANTE LLUERNA, SANTA COLOMA DE GRAMENET

La impregnación se basa en el hecho de que la mayoría de los alimentos sólidos (enteros, en porciones o granulados) tienen en su interior estructuras porosas, con espacios ocupados por aire. Cuando el alimento se somete al vacío en una máquina extractora de aire, buena parte de este abandona el sólido. Si el producto poroso y sin aire se sumerge en un líquido, cuando se vuelve a la presión atmosférica este ocupa parte de los poros vacíos e impregna el sólido, no solo en la superficie, sino también en su interior (en mayor o menor extensión según el grado de vacío conseguido y el tamaño de los poros). Este proceso suele llevarse a cabo a temperatura ambiente, en máquinas de vacío, pero también puede realizarse aplicando cocciones. Asimismo, pueden emplearse aparatos de vacío continuo como la olla a depresión (marca comercial Gastrovac) o el rotavapor (Rotaval en la versión culinaria).

Aunque ya en la cocina de principios del siglo XXI se utilizaban impregnaciones en platos a base de frutas y verduras, la receta de sandía impregnada de sangría de Albert Adrià en el restaurante Tickets visualizó la técnica de forma global. Los hermanos Roca, del Celler de Can Roca, impregnaron diferentes frutas y verduras con sabores y colores de remolacha, pomelo, naranja y menta, entre otros. Desde hace una década, Victor Quintillà ha convertido en un clásico de su restaurante Lluerna (Santa Coloma de Gramenet, Barcelona) el *mojito sólido*: un taco de melón (con el menor sabor posible) impregnado con el popular cóctel y espolvoreado con ralladura de lima. Y Virgilio Martínez propone recuperar el sabor andino del *sanki*. En su restaurante Central (Lima) utiliza esta fruta para elaborar un caldo con el que impregna otras frutas.

Con la popularización de las máquinas de vacío domésticas (en diferentes versiones y a precios muy ajustados), la impregnación comienza a llegar a los hogares. Quizás algún día dejará de ser exclusiva de la alta restauración. También la industria alimentaria, pendiente siempre de las nuevas técnicas culinarias, empieza a comercializar frutas con sabores a otros productos, como uvas con sabor a fresa. Sin duda este es un campo todavía por explorar que nos obsequiará con elaboraciones impensables.



Lydia Denworth es redactora colaboradora de *Scientific American* y autora de *Friendship: The evolution, biology, and extraordinary power of life's fundamental bond* (W. W. Norton, 2020).



MATEMÁTICAS

El problema de la significación estadística

Algunos métodos estadísticos tradicionales están recibiendo cada vez más críticas. ¿Hace falta cambiar la práctica científica?

Lydia Denworth

En 1925, el genetista y estadístico británico Ronald Fisher publicó el libro *Métodos estadísticos para quienes trabajan en investigación.* Aunque el título no auguraba un superventas, la obra acabó siendo un éxito que convirtió a Fisher en el padre de la estadística moderna. En ella abordaba el problema de cómo aplicar tests estadísticos a un conjunto de datos para saber si un determinado hallazgo merecía seguir siendo investigado. En particular, Fisher hacía referencia a un test para cuantificar hasta qué punto los datos experimentales resultaban compatibles con una determinada hipótesis de trabajo. Dicha compatibilidad quedaba recogida en un número conocido como «valor p», y Fisher recomendaba tomar como umbral $p = 0{,}05$: «Es conveniente tomar este punto como límite a la hora de juzgar si una desviación debe considerarse significativa o no». Busque resultados con valores p por debajo de ese umbral, aconsejaba, y no pierda tiempo con aquellos que lo superan. Así nació la idea de que un valor p inferior a 0,05 corresponde a resultados «estadísticamente significativos».

Casi un siglo después, numerosas disciplinas siguen considerando un valor p inferior a 0,05 como la regla de oro que certifica el mérito de un experimento. Dicho umbral abre las puertas a la financiación y la publicación y, como tal, sustenta la mayoría de las conclusiones científicas que acaban viendo la luz. Sin embargo, incluso Fisher entendió que el concepto de significación estadística y el valor p que lo sustentaba adolecían de limitaciones, la mayoría reconocidas desde hace décadas. «La excesiva dependencia de los tests de contraste de hipótesis es una forma pobre de hacer ciencia», escribía el psicólogo Paul Meehl en 1978. Los valores p a menudo se malinterpretan, y significación estadística

EN SÍNTESIS

El uso de valores *p* durante casi un siglo ha generado una falsa sensación de certeza y una crisis de reproducibilidad en varias disciplinas científicas.

Hoy existe una determinación creciente para reformar los métodos estadísticos usados en ciencia, aunque no hay acuerdo sobre qué medidas concretas deberían tomarse.

El mal uso de los valores *p* ha generado una falsa necesidad de certidumbre. Tanto los científicos como el público general deberían aprender a manejar e interpretar resultados inciertos.

MARK ALLEN MILLER

no equivale a significación práctica. Además, las decisiones metodológicas que atañen a todo trabajo experimental hacen posible que, de manera consciente o inconsciente, un investigador altere un valor *p*. «Como suele decirse, la estadística permite demostrar cualquier cosa», ironiza el estadístico y epidemiólogo Sander Greenland, profesor emérito de la Universidad de California en Los Ángeles y una de las principales voces reformistas. A menudo, los estudios que solo se centran en lograr la significación estadística o en señalar su ausencia acaban dando lugar a afirmaciones inexactas: muestran como verdaderas cosas que no lo son y viceversa. Cuando Fisher se retiró a Australia, le preguntaron si había algo en su dilatada carrera de lo que se arrepintiese. Según parece, respondió: «Haber mencionado 0,05».

En la última década el debate se ha intensificado. Un medio ha llegado a calificar los fundamentos del análisis estadístico como «el secreto más sucio de la ciencia», y otro ha denunciado «múltiples errores graves» en los tests de hipótesis. La economía experimental, la biomedicina y especialmente la psicología se han visto envueltas en una controvertida crisis de reproducibilidad, la cual ha revelado que un porcentaje sustancial de los hallazgos publicados no pueden replicarse. Un ejemplo es la idea de «pose de poder», la cual sostiene que un lenguaje corporal asertivo no solo influye en nuestra actitud, sino también en nuestras hormonas. Una conclusión basada en un artículo que, desde entonces, ha sido repudiado incluso por uno de sus autores. Un trabajo sobre la economía del cambio climático, escrito por un escéptico, «terminó teniendo casi tantas correcciones como puntos experimentales, [...] pero nada de eso bastó para que [el autor] cambiase su conclusión», escribía el estadístico de la Universidad de Columbia Andrew Gelman en su blog, donde suele citar ejemplos de investigaciones de mala calidad. «Está bien hacer un trabajo puramente teórico, pero entonces que no nos distraigan con datos», escribía Gelman.

Aunque no constituye el único factor, el concepto de significación estadística ha emergido como parte obvia del problema. En los últimos tres años, cientos de investigadores han pedido con urgencia una reforma y han firmado o apoyado artículos en prestigiosas revistas que pedían redefinir la idea o incluso abandonarla por completo. La Asociación Americana de Estadística (ASA), que en 2016 emitió una dura e inusual declaración sobre el asunto, ha argumentado a favor de «dejar atrás el mundo de $p < 0{,}05$». Ronald Wasserstein, director ejecutivo de la ASA, lo explica así: «Se supone que la significación estadística es como seleccionar a alguien en Tinder: solo indica un cierto nivel de interés. Pero, por desgracia, no es eso en lo que se ha convertido. La gente dice: "Tengo 0,05, estoy satisfecho". Eso detiene la ciencia».

La pregunta es si cambiará algo. «Nada de esto es nuevo, así que puede que esta vez todo acabe igual que las anteriores», advierte Daniel Benjamin, economista conductual de la Universidad del Sur de California y una de las voces reformistas. En cualquier caso, y aunque no todos estén de acuerdo con el remedio, llama la atención la cantidad de investigadores que convienen en el diagnóstico. El economista Stephen Ziliak afirma: «La cultura actual de los tests de significación estadística, su interpretación y su presentación tiene que desaparecer».

EL MUNDO TAL COMO ES

La ciencia intenta describir qué es cierto y qué no lo es. Y los científicos usan modelos estadísticos para inferir esa verdad. Para determinar, por ejemplo, si un tratamiento es más eficaz

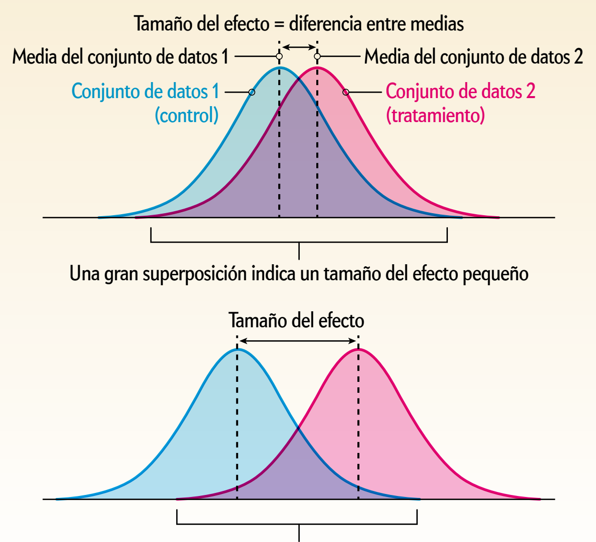
CONCEPTOS BÁSICOS

Significación estadística

Imagine que usted cultiva calabazas gigantes en su jardín. ¿Crecerán aún más si usa abono? Dada su larga experiencia en la labranza sin fertilizantes, usted sabe cuánto varía de manera natural el tamaño de las cucurbitáceas y también que su peso medio es de 10 kilogramos. Decide plantar 25 calabazas con abono y comprueba que el peso medio de la muestra es de 13,2 kilos. ¿Se debe esa diferencia de 3,2 kilos con respecto al «valor nulo» (10 kilos) a la casualidad o al uso de abonos?
En 1925, el estadístico Ronald Fisher propuso abordar la pregunta mediante el siguiente experimento mental: imagine que planta 25 calabazas un gran número de veces. En cada ocasión obtendrá un peso medio diferente debido a la variabilidad natural de los frutos. Represente la distribución de esos promedios y considere la probabilidad (**valor *p***) de obtener un resultado como el observado suponiendo que el abono no surte ningún efecto («hipótesis nula»). Por convenio, un valor *p* de 0,05 o menor se emplea como corte para identificar los resultados considerados «significativos» (en este caso, aquellos que inducirían a descartar la hipótesis de que el abono no produce ningún efecto). A continuación se detallan algunos conceptos asociados.

TAMAÑO DEL EFECTO

El tamaño del efecto asociado a un tratamiento indica la diferencia en el promedio obtenido con y sin tratamiento. El concepto puede usarse para comparar la media de varias muestras o de promedios «verdaderos» en distribuciones completas. El tamaño del efecto puede medirse en las mismas unidades que el resultado (kilos, en el caso de las calabazas). En ocasiones, sin embargo, no hay una unidad natural, como ocurre con las respuestas a los tests psicológicos. En tal caso pueden usarse tamaños de efecto relativos. Una manera de medirlos es a partir de la superposición de las distribuciones obtenidas para el grupo de tratamiento y el de control.

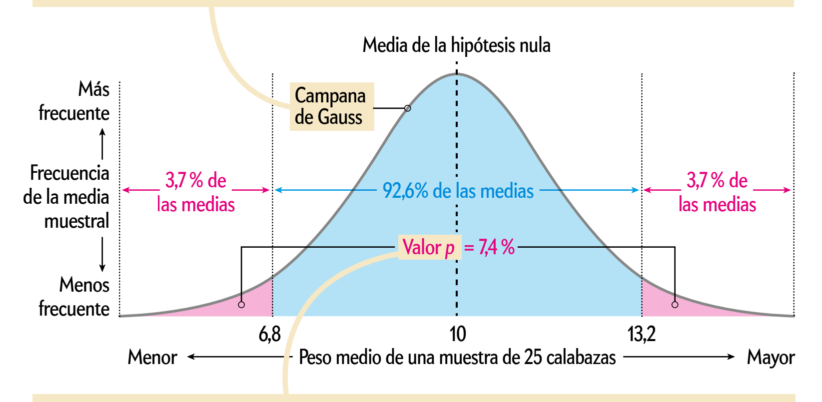


ILUSTRACIONES DE AMANDA MONTAÑEZ (*gráficas*) Y HEATHER KRAUSE

VALOR *P*

Para calcular el valor *p*, hemos de comparar la media de 13,2 kilos observada en nuestra muestra de 25 calabazas con la distribución de promedios que obtendríamos al tomar un gran número de muestras de 25 calabazas.

Esta campana de Gauss muestra la distribución de pesos promedio en muestras de 25 calabazas suponiendo que el abono no surte ningún efecto (hipótesis nula).

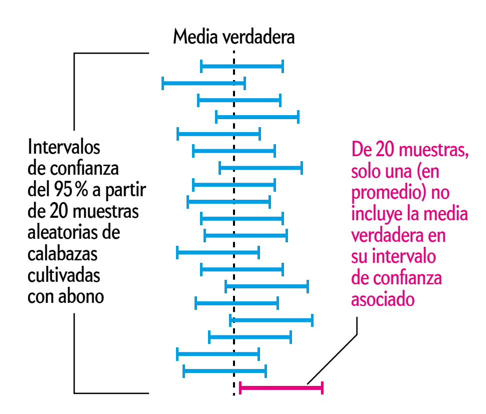


El valor *p* es la probabilidad de obtener, por puro azar, un peso medio tan o más alejado de 10 que la media observada (13,2). Dado que 13,2 – 10 = 3,2, buscamos la probabilidad de obtener una media mayor o igual que 13,2 o menor o igual que 6,8 (10 – 3,2). En este ejemplo, esa probabilidad total es de *p* = 0,074. Dado que *p* > 0,05, el aumento de tamaño no se consideraría un indicio significativo de que el abono haya surtido efecto.

Este ejemplo muestra un «test bilateral», donde el valor *p* estima la probabilidad de que el peso medio sea mayor que 13,2 o menor que 6,8. Sin embargo, bajo ciertas circunstancias puede hacerse un test unilateral (referente a un solo extremo de la campana de Gauss). En este caso el valor *p* sería de 0,037, por lo que el resultado sí se consideraría significativo. Esto ilustra una de las maneras en que, a partir de los mismos datos, el propósito original de un estudio puede modificarse para obtener un valor *p* menor.

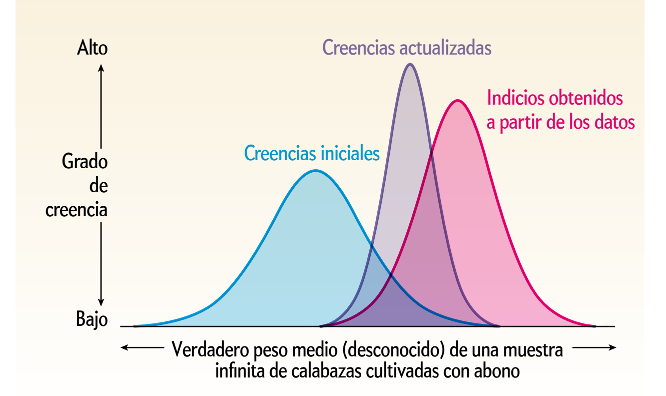
INTERVALO DE CONFIANZA

A partir de nuestra muestra de 25 calabazas, podemos calcular su intervalo de confianza del 95 por ciento. Este nos proporciona una estimación para el peso de las calabazas cultivadas con abono. El cálculo del intervalo de confianza implica invertir el del valor *p*. En nuestro ejemplo, el intervalo del 95 por ciento iría de 9,69 a 16,71 kilos (nótese que incluye el valor medio de la hipótesis nula: 10 kilos). El verdadero peso medio de las calabazas con abono puede encontrarse o no en ese intervalo. Entonces, ¿qué significa «95 por ciento»? Imagine que cultivásemos 25 calabazas una y otra vez. Cada muestra arrojaría una media y un intervalo de confianza diferentes. A la larga, sin embargo, el 95 por ciento de esos intervalos incluiría el verdadero peso medio de las calabazas cultivadas con abono. Con todo, no podemos saber si el intervalo obtenido en nuestro primer experimento pertenece al 95 por ciento de los casos que incluye la media verdadera o al 5 por ciento restante que no: es el *método* el que acierta el 95 por ciento de las veces.



MÉTODOS BAYESIANOS

En la inferencia bayesiana, la incertidumbre inicial de una persona sobre una cantidad desconocida queda representada por una distribución de probabilidad. Una vez que se obtienen datos, se aplica el teorema de Bayes para actualizar esa distribución inicial y ajustarla a los nuevos indicios. Esas creencias actualizadas se convierten así en las creencias iniciales del siguiente estudio. El problema en este caso reside en encontrar criterios «objetivos» que permitan determinar la distribución inicial de creencias, también conocida como distribución a priori. La meta es fijar una serie de criterios que puedan ser aceptados por todos los investigadores.

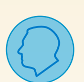


SORPRESA O AUTOINFORMACIÓN

El valor *p* nos dice cuán «sorprendente» es el peso de nuestras calabazas si suponemos que, en realidad, el abono no afecta a su crecimiento. Pero algunos autores han argumentado que este parámetro no comunica dicha idea de una manera intuitiva. En su lugar, proponen usar una cantidad conocida como sorpresa, autoinformación, valor *s* o transformada de Shannon, la cual convierte valores *p* en bits de información. Esta permite una interpretación sencilla en términos de lanzamientos de monedas.

Dos caras seguidas = **2** bits de sorpresa = valor *p* de $1/2^2$ = **0,25**

Cuatro caras seguidas = **4** bits de sorpresa = valor *p* de $1/2^4$ = **0,0625**

Cinco caras seguidas = 5 bits de sorpresa = valor *p* de $1/2^5$ = **0,03215**

Nuestra muestra de 25 calabazas con un peso medio de 13,2 kilos y un valor *p* de 0,074 produce entre 3 y 4 bits de sorpresa. En concreto, 3,76 bits, ya que $-\log_2(0{,}074) = 3{,}76$.

que otro. Cada modelo estadístico se basa en un conjunto de supuestos sobre cómo se han recopilado y analizado los datos y sobre cómo se presentan estos.

Tales resultados casi siempre se centran en un enfoque conocido como «contraste de la hipótesis nula», el cual genera un valor *p*. Dicho test no mira a la verdad de frente, sino más bien de reojo. Ello se debe a que está diseñado para indicar si una cierta línea de investigación debe proseguirse o no. «Lo que queremos saber cuando efectuamos un experimento es la probabilidad de que nuestra hipótesis sea cierta», explica Benjamin. «Pero [una prueba de significación estadística] responde a una pregunta alternativa: si mi hipótesis fuera falsa, ¿cuán improbables serían mis datos?»

En ocasiones eso funciona. La búsqueda del bosón de Higgs proporciona un ejemplo extremo pero útil. La hipótesis nula era que la partícula no existía; la alternativa, que debía existir. Los físicos del Gran Colisionador de Hadrones (LHC) del CERN llevaron a cabo una descomunal cantidad de experimentos y obtuvieron un valor *p* tan diminuto que significaba que, si el bosón de Higgs *no* existía, la probabilidad de haber obtenido ese tipo de datos era de uno entre varios millones. Así las cosas, la hipótesis nula se descartó por insostenible. Además, los físicos llevaron a cabo una doble verificación para asegurarse de que incluso ese resultado no se debiese a un error. «La única forma de dar por seguro aquel descubrimiento de enorme importancia científica —y el premio Nobel— era mostrar que los datos habían pasado por aros de fuego que garantizaban que ninguno de los posibles problemas podían producir un valor *p* tan pequeño», indica Greenland. «Un valor tan minúsculo estaba diciendo que el modelo estándar sin el bosón de Higgs no podía ser correcto.»

Pero la física permite un nivel de precisión inalcanzable en otras disciplinas. Cuando se trabaja con personas, como en psicología, resulta imposible lograr probabilidades de uno entre varios millones. Un valor *p* de 0,05 nos dice que, al efectuar múltiples tests, la probabilidad de rechazar la hipótesis correcta es de 1/20. No indica, como se cree a menudo, que la probabilidad de error en cada una de las pruebas individuales sea del 5 por ciento. Por eso, hace tiempo que los estadísticos introdujeron el concepto de intervalo de confianza como una manera de cuantificar el error o la incertidumbre. Los intervalos de confianza están relacionados con los valores *p*. Si nuestro umbral de significación estadística es $p = 0{,}05$, el intervalo de confianza asociado será del 95 por ciento ($1 - 0{,}05 = 0{,}95$). Pero dicho intervalo no es más que una forma útil de resumir los resultados del contraste de hipótesis para muchos «tamaños del efecto» (una medida de cuán grandes son las diferencias entre, por ejemplo, un grupo de tratamiento y un grupo de control). «No hay nada en ello que deba inspirar confianza», advierte Greenland. Con el tiempo, sin embargo, tanto los valores de *p* como los intervalos de confianza arraigaron y ofrecieron una falsa ilusión de certidumbre.

En sí mismos, los valores *p* no son el problema. Ofrecen una herramienta útil cuando se consideran en su justo contexto. Eso es lo que los editores de las revistas científicas, los financiadores y los reguladores aseguran que hacen. El problema aparece cuando se exagera su importancia, algo en lo que resulta muy fácil caer cuando se trabaja con muestras pequeñas. Fue eso lo que condujo a la actual crisis de replicabilidad. En 2015, Brian Nosek, cofundador del Centro para la Ciencia Abierta, encabezó una iniciativa para reproducir los resultados de cien conocidos artículos de psicología social y encontró que solo un tercio de los estudios se dejaba replicar sin ambigüedades. En 2018, el



MARK ALLEN MILLER

Proyecto para la Replicabilidad en Ciencias Sociales se propuso repetir 21 trabajos experimentales publicados entre 2010 y 2015 en las prestigiosas *Nature* y *Science*. Los autores hallaron un efecto significativo del mismo tipo que en los estudios originales en solo 13 casos (el 62 por ciento de los trabajos). Además, el tamaño del efecto en las réplicas fue, en promedio, aproximadamente la mitad que el referido en un principio.

También la genética sufrió una crisis de replicabilidad a principios de este siglo. Y tras largos debates, el umbral aceptado para calificar un resultado como estadísticamente significativo se hundió: «Cuando hallamos una variación genética relacionada con alguna enfermedad u otro fenotipo, el estándar de significación estadística es de 5×10^{-8}; 0,05 dividido por un millón», aclara Benjamin, que también ha investigado en genética. «Hoy en día los estudios sobre genética humana se consideran muy sólidos.»

No puede decirse lo mismo de la biomedicina, donde el riesgo se inclina hacia los falsos negativos, con investigaciones que anuncian una falta de significación estadística cuando sí que existen efectos. Una ausencia de pruebas no equivale a probar la ausencia de algo, del mismo modo en que no llevar un anillo de boda no significa que una persona no esté casada.

DIFUMINAR LOS ESTÁNDARES

¿Cuál es la magnitud del problema? En general, existe un amplio acuerdo entre científicos de diversas disciplinas de que el énfasis excesivo en los valores *p* y la significación estadística constituye un problema real, aunque no todos lo consideran igual de grave. «Hay que pensar a largo plazo», sostiene Blair T. Johnson, psicólogo social de la Universidad de Connecticut. «La ciencia pasa periódicamente por esto. El péndulo oscila de un lado a otro y es algo con lo que hay que vivir.» El beneficio de ese vaivén, afirma, es que nos recuerda que hemos de ser humildes sobre nuestras inferencias.

Sin embargo, para avanzar hay que acordar soluciones, algo tan complicado como la estadística en sí. «El miedo es que abandonar esta práctica largamente establecida de declarar un resultado como estadísticamente significativo lleve a la anarquía»,

previene Wasserstein. Aun así, las sugerencias abundan. Estas incluyen cambios en los métodos estadísticos, en el lenguaje usado para describirlos y en la forma en que se emplean los análisis estadísticos. Las ideas más destacadas han ido apareciendo en una serie de artículos que comenzó una declaración de la ASA en 2016, en la que más de dos docenas de estadísticos acordaron varios principios de reforma. Más tarde, un número especial de una de las revistas de la asociación publicó 45 artículos sobre cómo ir más allá de la significación estadística.

En 2018, un grupo de 72 científicos publicó en *Nature Human Behaviour* una tribuna titulada «Redefinir la significación estadística», la cual defendía mover el umbral exigido para proclamar un descubrimiento de 0,05 a 0,005 (los hallazgos con valores *p* entre 0,05 y 0,005 pasarían a considerarse «sugerentes»). Benjamin, el autor principal de ese texto, ve en la medida una solución imperfecta a corto plazo, pero con la ventaja de que podría ponerse en marcha de inmediato. «Mi preocupación es que, si no hacemos algo ya, perderemos el impulso para llevar a cabo las grandes reformas que realmente mejorarán las cosas y malgastaremos el tiempo en discusiones sobre la solución ideal. Mientras tanto, se causará mucho más daño que el que ya se ha hecho.» En otras palabras: no permitir que el perfeccionismo se convierta en parálisis.

Otros sostienen que redefinir el umbral de significación estadística no serviría para nada, ya que el verdadero problema reside en la existencia misma de un umbral. El pasado marzo, Greenland, Valentin Amrhein, zoólogo de la Universidad de Basilea, y Blakeley McShane, estadístico y experto en mercadotecnia en la Universidad Noroccidental de EE.UU., publicaron una tribuna en *Nature* que abogaba por abandonar para siempre el concepto de significación estadística. Los autores proponían que los valores *p* se usasen como una variable más junto con otros indicadores y que los intervalos de confianza pasaran a llamarse «intervalos de compatibilidad», para reflejar lo que en realidad muestran: compatibilidad con los datos, no confianza en el resultado. Solicitaron el respaldo de sus ideas en Twitter. Ochocientos científicos, Benjamin incluido, se adhirieron.

Sin duda, hoy disponemos de mejores técnicas estadísticas que antes, o al menos son más fáciles de usar. Gelman, que con frecuencia cuestiona los métodos empleados por otros, jamás usa en su propio trabajo el análisis de significación de la hipótesis nula. En su lugar, prefiere los métodos bayesianos, un enfoque que parte de nuestras creencias iniciales y las actualiza a medida que van apareciendo nuevos indicios. Por su parte, Greenland está promoviendo el uso del concepto de «sorpresa» (*surprisal*) o «autoinformación», una cantidad que asocia bits de información a cada valor *p*. Por ejemplo, un valor *p* de 0,05 equivale a 4,3 bits frente al caso nulo. «Es como obtener cuatro caras seguidas al lanzar una moneda», ejemplifica Greenland. «¿Constituye eso un indicio muy sólido de que la moneda estaba trucada? No. En realidad, observamos ese resultado con cierta frecuencia, por eso 0,05 es un estándar débil.» Si los investigadores hiciesen constar la autoinformación junto a cada valor *p*, argumenta, se verían empujados a usar mejores estándares. También sería útil poner énfasis en el tamaño del efecto.

Una mejora de la educación estadística, tanto para científicos como para el público general, podría comenzar por el lenguaje. Cuando Fisher adoptó el concepto de significación, la palabra tenía menos peso que hoy. «Entonces se refería a "algo con significado", no a "algo importante"», matiza Greenland. Tampoco sorprende que el concepto de intervalo de confianza tienda a infundir, precisamente, un exceso de confianza.

ABRAZAR LA INCERTIDUMBRE

La significación estadística ha avivado el ansia humana por la certidumbre. «El pecado original es desear certidumbre cuando no procede», apunta Gelman. Puede que haya llegado el momento de acostumbrarnos a la inseguridad. Si eso ocurre, los artículos científicos cambiarán por completo. Informar sobre un hallazgo importante «debería ocupar un párrafo, no una frase», dice Wasserstein. Tampoco debería estar basado en un solo estudio. En último término, una teoría exitosa es aquella capaz de resistir décadas de escrutinio.

Se están produciendo pequeños cambios. «Estamos de acuerdo en que los valores *p* a veces se usan en exceso o de manera equivocada», señala Jennifer Zeis, portavoz del *New England Journal of Medicine*. «Concluir que un tratamiento es eficaz si $p < 0{,}05$ e inútil si $p > 0{,}05$ obedece a una visión reduccionista de la medicina que no siempre refleja la realidad.» Zeis explica que ahora los artículos incluyen menos valores *p*, su revista fomenta la publicación de protocolos de investigación más detallados y también que los autores sigan planes de análisis preestablecidos e informen cuando se desvían de ellos.

La Agencia Federal de Fármacos y Alimentos (FDA) de EE.UU. no ha modificado sus requisitos para los ensayos clínicos, según reconoce John Scott, director de la División de Bioestadística. «Considero muy improbable que los valores *p* desaparezcan en breve del desarrollo de fármacos, aunque sí preveo una mayor aplicación de enfoques alternativos», dice. Por ejemplo, los investigadores están cada vez más interesados en la inferencia bayesiana. «En general, el debate refleja una toma de conciencia sobre las limitaciones de la inferencia estadística tal y como se practica tradicionalmente.»

Johnson, editor entrante del *Psychological Bulletin*, coincide en muchos aspectos con su predecesor, pero aclara: «Intento forzar la conformidad para conseguir estándares muy estrictos en los trabajos. Así me aseguro de que todos saben lo que pasa y por qué, lo que permite juzgar más fácilmente si los métodos son válidos o defectuosos». También enfatiza la importancia de los metanálisis bien ejecutados y de las revisiones sistemáticas como formas de reducir la dependencia en estudios individuales.

Sobre todo, un valor *p* «no debería ser un guardián», sostiene McShane. «Tomemos una visión más holística, matizada y evaluativa.» Algo que incluso los coetáneos de Ronald Fisher habrían apoyado. Ya en 1928, otros dos gigantes de la estadística, Jerzy Neyman y Egon Pearson, escribieron: «Los tests estadísticos por sí mismos no dan un veredicto final, pero, como herramientas que son, ayudan al trabajador que los usa a tomar una decisión». IyC

PARA SABER MÁS

Evaluating the replicability of social science experiments in *Nature* and *Science* between 2010 and 2015. Colin F. Camerer et al. en *Nature Human Behaviour*, vol. 2, págs. 637-644, septiembre de 2018.
Moving to a world beyond «$p < 0.05$». Ronald L. Wasserstein, Allen L. Schirm y Nicole A. Lazar en *American Statistician*, vol. 73, págs. 1-19, marzo de 2019.

EN NUESTRO ARCHIVO

El valor resbaladizo de *p*. Regina Nuzzo en *IyC*, diciembre de 2014.
Hacer reproducible la investigación. Shannon Palus en *IyC*, diciembre de 2018.
Comunicar la incertidumbre. Jessica Hullman en *IyC*, noviembre de 2019.


BAKAL

NEUROCIENCIA

LAS RAÍCES DE LA AGRESIVIDAD HUMANA

Gracias a experimentos con animales y seres humanos se empieza a vislumbrar la génesis de las conductas violentas en el cerebro

R. Douglas Fields

Ilustración de Scott Bakal

R. Douglas Fields es profesor adjunto de neurociencias y ciencias cognitivas en la Universidad de Maryland en College Park y jefe de la sección de desarrollo y plasticidad del sistema nervioso en el Instituto Nacional de Salud Infantil y Desarrollo Humano.



Apostado en el piso 32 del hotel Mandalay Bay de Las Vegas, un francotirador armado con rifles de largo alcance y automáticos disparó un millar de proyectiles contra la multitud que asistía a un concierto, asesinando a 58 personas e hiriendo a otras 869. Después de suicidarse en la escena del crimen, su cerebro fue remitido a la Universidad Stanford en busca de una posible explicación biológica a la atroz masacre.

¿Qué podrían hallar los expertos en un examen así? Bastante, en efecto. Aunque no se adivine en el horizonte ninguna prueba genética del comportamiento homicida, este tipo de investigaciones ayuda a comprender cómo el cerebro controla la conducta violenta. Aplicando los mismos métodos experimentales que han permitido rastrear los circuitos cerebrales involucrados en otras actividades complejas (como caminar, hablar o leer), los neurocientíficos descubren las vías del comportamiento agresivo. Estos hallazgos desvelan los mecanismos subyacentes a los actos de violencia inusitada, como la matanza ocurrida en Las Vegas en 2017, pero también explican los accesos más cotidianos de rabia al volante e incluso la reacción fulminante de una madre ante cualquier amenaza que se cierna sobre su hijo.

La violencia física, en ocasiones mortal, ocupa el centro de la lucha natural por la supervivencia del más fuerte, por lo que todos los animales han desarrollado circuitos neurales especializados para ejecutar y controlar la agresividad.

En sus experimentos pioneros con gatos a finales de la década de 1920, Walter Hess descubrió un núcleo profundo del hipotálamo que desencadena una agresión violenta. Resulta que en ese mismo lugar se activan otros impulsos poderosos, como el sexo o el hambre y la sed. Cuando Hess estimuló ese nudo de neuronas en un gato manso por medio de un electrodo inserto, el felino bufó con furia y se abalanzó en el acto contra otro animal de la jaula, al que dio muerte. El cerebro humano posee esa misma zona: el área hipotalámica de ataque.

Ese descubrimiento dio lugar al concepto tan popular del «cerebro de lagarto», una teoría según la cual los impulsos primitivos del ser humano emanan de un centro nervioso filogenéticamente antiguo que, en las circunstancias idóneas, desata un comportamiento propio de una bestia. Desde el hallazgo de Hess, la cuestión esencial a la que se han enfrentado los científicos durante casi un siglo han sido los circuitos que regulan la región hipotalámica de ataque y desatan o reprimen los ataques. Técnicas relativamente novedosas como la optogenética (un método experimental para activar o desactivar los circuitos neurales) o las cámaras de fibra óptica enroscadas al cerebro de los animales de experimentación para observar la descarga de las neuronas durante un ataque, permiten responder a algunas preguntas. De hecho, ahora se conocen los circuitos de la rabia y de la agresión.

Por razones éticas, gran parte de la búsqueda con métodos empíricos de los neurocircuitos del comportamiento violento se enmarca en la investigación animal. Conviene ser cauto al

EN SÍNTESIS

El ser humano y los animales recurren a veces a la violencia para obtener alimento o como medio de defensa.

La decisión de emprender una agresión entraña riesgos y pone en juego circuitos neuronales específicos.

Las vías nerviosas que responden a las amenazas inmediatas difieren de las que requieren deliberación.

Las anomalías cerebrales afectan con más frecuencia a los delincuentes violentos que a los que carecen de ese tipo de antecedentes.

aplicar la terminología de los estudios con animales a las conductas y emociones humanas, por más que existan claros paralelismos entre la violencia humana y la de otros vertebrados. Enzarzarse en una pelea resulta peligroso para cualquiera, de ahí que tal comportamiento esté sujeto a una regulación estricta y se exhiba solo ante ciertos tipos de amenaza.

El ser humano y los animales recurren de manera instintiva a la agresión, incluso a la violencia mortal, con el fin de obtener alimento, proteger a sus crías o defenderse. Pero las conexiones que participan en tales acciones, como, por ejemplo, matar a una presa o proteger a una cría, son diferentes.

Además, muchos animales pertenecen a especies con un alto grado de socialización, por lo que la agresión representa un modo de definir y mantener la jerarquía social: piense en un par de carneros que miden sus fuerzas con sus testuces para dirimir cuál se apareará con las hembras. Entre los seres humanos, la pena capital, el encarcelamiento y la privación forzada de recursos (multas y revocación de privilegios) suponen formas codificadas de agresión destinadas a mantener el orden social. La defensa territorial, la protección de los miembros del grupo y la competencia son otros hechos paralelos que permiten extrapolar, a partir de los estudios con animales de experimentación, los neurocircuitos humanos que intervienen en cada tipo de agresión.

Desde la perspectiva de la psicología, la lista de motivos y provocaciones que desatan una reacción agresiva se diría casi interminable, pero desde la óptica de la neurociencia, solo algunos circuitos del cerebro intervienen en ella. La identificación y el estudio de su funcionamiento siguen siendo objeto de investigación, pues reviste gran importancia. La capacidad de agresión, arraigada en nuestro cerebro tras eones de lucha con uñas y dientes por la supervivencia, suele quedar alterada por las enfermedades, los medicamentos o los trastornos mentales, en ocasiones con consecuencias trágicas.

CENTROS ENCEFÁLICOS

Neuroanatomía de la agresividad

AMÍGDALA. Situada en el interior del lóbulo temporal, responde a acontecimientos cargados de emociones y participa en la detección de amenazas, el miedo, la agresión y la ansiedad.

TRONCO ENCEFÁLICO. Las fibras nerviosas de todo el cerebro y la médula espinal pasan a través de este nexo. Durante una pelea, controla los movimientos reflejos de la cabeza.

HIPOTÁLAMO. Estación de relevo de la información que discurre entre el cerebro y la médula espinal, regula la secreción hormonal por la hipófisis y sostiene las funciones vitales, como la termorregulación, la alimentación, el comportamiento sexual y la agresividad.

SISTEMA LÍMBICO. Esta red del centro del cerebro interconecta la amígdala, el hipotálamo, el hipocampo y la corteza cerebral y fusiona emoción, aprendizaje, memoria y detección de amenazas.

HIPÓFISIS. Situada en la parte superior del tronco encefálico, vierte hormonas en el torrente sanguíneo para controlar la respuesta de lucha o huida y la reproducción.

CORTEZA PREFRONTAL. Región cortical ubicada en la parte frontal del cerebro (detrás de la frente) que integra la información para la toma de decisiones complejas, la canalización de la atención y el control de los impulsos.

LOS CIRCUITOS DE LA AGRESIÓN

El recurso de la fuerza está plagado de riesgos, por lo que la decisión de atacar depende de una extensa e intrincada red de circuitos que abarca todo el cerebro. Para entender la anatomía de la agresividad, hay que pensar en el cerebro como si fuera una seta. La piel delicada que cubre el sombrero equivale a la corteza cerebral. Con solo tres milímetros de grosor, es el centro de las funciones cognitivas superiores, la esencia de lo que nos hace humanos. Además, interviene en la integración sensitivomotora (percepción que desencadena una acción) e incluso en la propia consciencia, y desempeña un papel crucial en la decisión de desplegar, o no, un comportamiento agresivo.

La amígdala, situada en la profundidad de la corteza cerebral, evalúa rápidamente la información sensorial de una amenaza: quedaría ubicada en la parte superior del pie de la seta, desde donde irradian las láminas que sostienen el sombrero. Profusamente ramificada, con enlaces entrantes y salientes que se extienden de la corteza al hipotálamo, esta estructura con forma de almendra actúa como estación central de relevo de la información sensorial que llega al cerebro, así como de la que desciende por la corteza y que transmite el resultado de la toma de decisiones y de otras cadenas de procesamiento de alto nivel.

El hipotálamo, ubicado asimismo en la parte superior del pie de la seta, es la región fundamental del cerebro que controla de manera inconsciente las funciones automáticas, como son la frecuencia cardíaca, la temperatura, la respiración, los ciclos del sueño, la atención y la secreción de hormonas por la hipófisis. Aquí se genera el impulso emocional que inicia el ataque. El tronco encefálico, análogo a la base del pie del hongo, es el canal que vehicula la información entre el cerebro y la médula espinal. Para definir esta analogía con exactitud, conviene recordar que el cerebro humano es una estructura par, con un hemisferio izquierdo y otro derecho. La amígdala, por poner un ejemplo, se encuentra en ambos lados.

Las numerosas regiones que controlan el comportamiento agresivo permiten pensar impulsiva o reflexivamente cada vez que el individuo afronta una amenaza. Más deliberativa, la reacción lenta es en cambio la más compleja; la corteza prefrontal desempeña en ella un papel crítico en la toma de decisiones. La neurocientífica Simone Motta, del laboratorio de Newton Sabino Canteras de la Universidad de São Paulo, y sus colaboradores captaron en un estudio de 2013 los pormenores biológicos de la conocida respuesta de «mamá osa», que en absoluto se limita a este plantígrado.

A través del microscopio observaron el hipotálamo de una rata instantes después de que un macho intruso penetrara en la jaula donde ella se hallaba con sus crías recién nacidas; la madre se abalanzó de inmediato contra él. Después de teñir el tejido cerebral *postmortem*, identificaron una proteína llamada Fos en la diminuta región hipotalámica de ataque. Al microscopio parecía como si la región se hubiera punteado con un bolígrafo negro. La aparición repentina de Fos, plasmada en la tinción negra, obedeció a su rápida síntesis tras las ráfagas de impulsos eléctricos lanzados por las neuronas de la región de ataque cuando la madre presenció la irrupción del intruso. Otros grupos de investigación han confirmado ese vínculo con el comportamiento agresivo tras insertar una cámara de fibra óptica

en la región hipotalámica de ataque de ratones genomodificados para que sus neuronas emitan destellos de luz cuando entran en acción.

Cuando esa agrupación de neuronas de la región de ataque (conocida como el núcleo ventral premamilar) se extirpó antes de la irrupción del intruso, el grupo de Motta advirtió que la probabilidad de que la madre respondiera con un ataque defensivo era mucho menor. Ahora bien, la destrucción de dichas neuronas no afectó a la respuesta materna ante un gato u otras amenazas. Los electrodos de Hess de hace casi un siglo eran demasiado toscos para revelar el subcircuito fino de agresividad incrustado dentro de la región hipotalámica de ataque. Los nuevos métodos de análisis proporcionan un cuadro mucho más detallado.

Para que el intruso active esta área, es preciso que el hipotálamo reciba, procese y transmita la información sensorial del atacante. Todos los sentidos relevantes alcanzan el cerebro a través de distintas vías: la información visual la canaliza el nervio óptico, y el sentido del olfato, el olfativo. La información sensorial aferente (entrante) llega a la corteza cerebral, donde es analizada para extraer las características detalladas del estímulo y para emitir hacia otra región cortical más especializada la señal correspondiente a cada sentido. La corteza visual, situada en la parte posterior de la cabeza captará, por ejemplo, la forma, el color y el movimiento de un objeto ubicado frente al campo visual más amplio, y luego transmitirá dicha información a otras regiones corticales que facilitan la percepción por nuestra consciencia, por ejemplo, el reconocimiento de un rostro familiar.

El recurso de la fuerza está plagado de riesgos, por lo que la decisión de atacar depende de una extensa e intrincada red de circuitos neuronales que abarca todo el cerebro

Pero este procesamiento complejo de la información, en el que intervienen varias regiones corticales de modo secuencial lleva su tiempo, como sucede cuando se fabrica un automóvil en una línea de montaje. Ante una amenaza repentina, como un puño lanzado contra la barbilla, no habría tiempo para procesar el estímulo visual y percatarnos conscientemente antes de recibir el golpe. Por esa razón, existe una vía subcortical de alta velocidad, en la que participa la amígdala, que transmite con celeridad las aferencias sensoriales a los circuitos cerebrales encargados de detectar las amenazas. La información procedente de los sentidos alcanza la amígdala antes que la corteza cerebral y la consciencia, razón por la cual nos apartamos de una pelota perdida que entre de repente en nuestro campo visual y luego nos preguntamos: «¿Qué era eso?». Todo objeto que irrumpa súbitamente en nuestro espacio personal es percibido como una amenaza, aunque no nos formemos una imagen precisa de él. Al igual que el detector de movimiento de un sistema de seguridad, la amígdala detecta algo que no debería estar ahí y activa una respuesta fulminante para hacer frente a esa amenaza.

El ser humano depende en gran medida de la visión, pero el olfato reviste más importancia para muchos animales. En los experimentos de Motta, el olor del macho probablemente activó el detector de amenazas de la rata madre, información que se transmitió de inmediato al área hipotalámica de ataque. El examen microscópico de la amígdala reveló dos puntos que se teñían claramente de Fos en respuesta al ataque del intruso. Ambas ubicaciones, situadas en el núcleo medial de la amígdala, reciben información de la región olfativa. El núcleo premamilar del hipotálamo, donde se concentra la respuesta materna de agresividad, alberga neuronas que solo responden al olor del sexo opuesto.

Otra parte de la amígdala, el núcleo posterior, también mostró una extensa tinción de Fos. Sus neuronas poseen detectores de hormonas (mineralocorticoides) que vinculan el estrés con un desencadenante de la agresión. En otros experimentos con machos agresivos, las ratas se amansaron tras bloquear dichos receptores. Esta observación explica en parte cómo diversos aspectos de una situación concreta, bien el estrés, bien otros factores, reducen el umbral necesario para desencadenar la agresión.

EXPERIMENTOS CON HUMANOS

Todos estos estudios pretenden averiguar si la activación o la desconexión de un área cerebral concreta produce un comportamiento específico. Sin embargo, los experimentos con animales no revelan gran cosa sobre las sensaciones reales implicadas en cualquiera de los comportamientos resultantes. Estimular el cerebro de la rata con un electrodo puede causar un dolor que desate una reacción violenta, sin dar ninguna pista sobre si esta obedeció directamente a la activación de un centro vinculado a la agresión.

Ahora bien, ciertos experimentos efectuados en el pasado con humanos no dejan sombra de duda acerca del papel que la amígdala desempeña en la manifestación de emociones extraordinariamente violentas. En los años sesenta, cuando el neurocientífico José Manuel Rodríguez Delgado estimuló con un electrodo implantado la amígdala derecha de una joven mientras tocaba tranquilamente la guitarra, esta dejó de rasguear y cantar, arrojó el instrumento en un arrebato de rabia y la emprendió a golpes con una pared cercana. Estas emociones tan poderosas que precipitan comportamientos violentos anulan los impulsos antagónicos. El riesgo que se corre al atacar es que la reacción del oponente se salde con una lesión grave, o incluso con la muerte del agresor, o en caso contrario, todo acabe en la humillación que supone poner los pies en polvorosa.

Tanto en la rata como en el ser humano, las sedes nerviosas de la rabia ciega forman parte de una amplia red que se extiende más allá de la amígdala y desencadena el comportamiento violento. Se ha descubierto un lugar en la región septal, parte del cual se conoce como sistema límbico subcortical, que se activa después de que la rata haga frente al intruso para proteger a sus crías. Dicha área septal inicia respuestas emocionales in-

Las vías de la rabia

Las redes del cerebro humano transmiten señales que fomentan o, por el contrario, reprimen el comportamiento agresivo. Uno de los centros clave es el «área hipotalámica de ataque», unas minúsculas agrupaciones de neuronas donde el cerebro recibe información (aferencias) que regula la aceleración del corazón y otras respuestas fisiológicas previas al acto violento **A**. Desde otro lugar, la amígdala recibe información de los sentidos y del área de la superficie cerebral que detecta la presencia de una amenaza **B**. La corteza controla los impulsos rebeldes **C**. Los circuitos de recompensa y de rabia están interconectados **D**.

Núcleos del lecho de la estría terminal
Corteza cerebral
Recompensa D
Control de los impulsos y toma de decisiones C
Estriado derecho
Estriado izquierdo
Adrenalina y cortisol (respuesta de lucha o huida)
Hipocampo
Núcleo amigdalino posterior
Amígdala
Tronco encefálico
Glándulas suprarrenales
Hipotálamo
Hipófisis
Corteza prefrontal
B Detección de amenazas
Función reguladora: frecuencia cardíaca, presión arterial y respuesta de lucha o huida
MPO
LPO
NA
PN
DMH
PVN
FM
VMH
F
A
M
SO
PM
OT
Área hipotalámica de ataque (*recuadro delimitado por la línea discontinua*)
PVN
PVN
Presión arterial, temperatura corporal y apetito
PN
PM
DMH
M
VMH
III
Área hipotalámica de ataque y respuestas fisiológicas a la agresión A
Hormonas del estrés
PP
AH (libera hormonas bajo el control del hipotálamo)
Alimentación sólida y líquida
Agresión y apareamiento

Subestructuras neuronales

- **A** Núcleo hipotalámico anterior
- **AH** Lóbulo anterior de la hipófisis (adenohipófisis)
- **DMH** Núcleo hipotalámico dorsal
- **F** Fórnix
- **FM** Fascículo mamilar
- **LPO** Núcleo preóptico lateral
- **M** Cuerpo mamilar
- **MPO** Núcleo preóptico medial
- **NA** Núcleo accumbens
- **OT** Tracto óptico
- **PM** Núcleo premamilar
- **PN** Núcleo hipotalámico posterior
- **NH** Lóbulo posterior de la hipófisis (neurohipófisis)
- **PVN** Núcleo paraventricular
- **SO** Núcleo supraóptico
- **VMH** Núcleo ventromedial del hipotálamo
- **III** Tercer ventrículo

tensas, como la rabia explosiva, pero también se activa durante las relaciones sexuales y otros actos gratificantes. En los años cincuenta, James Olds y Peter Milner comprobaron que las ratas con electrodos implantados en ella presionaban hasta 5000 veces por hora una barra para estimular eléctricamente estas neuronas, antes de caer agotadas.

La contrapartida a estos experimentos se pone de manifiesto con la participación humana. Cuando Delgado estimuló las regiones septales de algunos pacientes, estos se sintieron abrumados por un deseo sexual intenso que en última instancia culminó en un orgasmo. Una paciente trató incluso de seducir y pedir matrimonio al terapeuta.

En estudios publicados en 1972, ahora tildados como poco éticos, el psiquiatra Robert G. Heath, de la Universidad de Tulane, intentó «curar» a un joven de su homosexualidad. Para ello, implantó electrodos en la región septal de manera que los médicos o el propio paciente pudieran aplicar una estimulación que proporcionara placer sexual mientras visionaba películas pornográficas heterosexuales o mantenía relaciones íntimas con una prostituta. Heath señaló que el sujeto se estimuló hasta alcanzar la euforia. (Sin embargo, su orientación sexual no cambió.)

Las neuronas de esta parte del área septal (los núcleos del lecho de la estría terminal, o NLET), que se activaron durante la agresión materna en los estudios con animales, también poseen receptores para la noradrenalina, un neurotransmisor implicado en las respuestas al estrés. Esta región cerebral se conecta con el hipotálamo para controlar las respuestas autónomas y la liberación de hormonas, como la oxitocina o el neurotransmisor dopamina, que regulan el estrés, el estado de ánimo y la ansiedad: asimismo recibe información de la corteza cerebral.

El aspecto gratificante de la agresividad, como los sentimientos de superioridad y dominación, explica el componente hedonista de la intimidación, así como la violencia criminal psicopática y brutal

La intensidad del circuito de agresión sube y baja. La corteza prefrontal inhibe o estimula el sistema límbico, reprimiendo los impulsos o iniciando una acción violenta tras la deliberación que tiene lugar en las áreas superiores de procesamiento cognitivo. Este control «descendente» de la corteza prefrontal contrasta con el «ascendente», es decir, la rápida respuesta refleja a un estímulo ambiental repentino, como cuando se desvía o se esquiva sin pensarlo una pelota que viene derecha hacia nosotros. A los animales y a las personas cuyas conexiones entre la corteza prefrontal y el sistema límbico son débiles les cuesta refrenar sus impulsos.

Los centros de recompensa del cerebro, como el cuerpo estriado y el núcleo accumbens, donde actúa la dopamina, son otro componente de los circuitos de la agresividad. Numerosos estupefacientes (metanfetamina y cocaína, entre otros) aumentan la secreción de dopamina, que modula la recompensa, y activan este circuito. Cuando una rata macho derrota a un intruso que irrumpe en su jaula, activa de manera repetida una palanca para abrir el pasillo e invitar al desconocido a luchar de nuevo. Pero si se bloquea la señalización de la dopamina con un medicamento, el vencedor no busca más pelea.

El aspecto gratificante de la agresividad, como los sentimientos de superioridad y de dominación, explica el componente hedonista de la intimidación, así como la violencia criminal psicopática y brutal. En nuestra sociedad moderna, en que los supermercados sacian el hambre y la sed, la sensación gratificante que brindaba la captura de una presa se ve satisfecha ahora con actividades recreativas como la caza o la pesca.

DIFERENCIAS ENTRE SEXOS

El principal factor para predecir el comportamiento agresivo es el sexo. Según las estadísticas de la Oficina Federal de Prisiones de EE.UU. de 2018, el 93 por ciento de los reclusos son varones. El vínculo entre la agresividad y el sexo masculino destaca en el reino animal y pone de manifiesto la existencia de una sólida base biológica. Las hormonas influyen en buena medida en los circuitos que rigen el comportamiento agresivo, pero la presión selectiva que recae sobre el macho, en especial en los mamíferos gregarios (la mayoría de los primates lo son), ha fomentado atributos que aumentan la probabilidad de una actitud agresiva durante la búsqueda de pareja, la consecución de una posición social elevada, la obtención de alimento y la defensa del territorio o de la tribu.

David Anderson, del Instituto de Tecnología de California, y sus colaboradores han investigado los circuitos que explican la desconcertante relación que vincula el sexo con la violencia. La investigación de este neurocientífico ha desvelado parte del mecanismo que permite que un mismo circuito cerebral intervenga en sentimientos tan opuestos como el amor y el odio. Y es que, desde la perspectiva fisiológica, la agresividad y el apareamiento comparten ciertos rasgos. Ambos causan estados intensos de excitación y, si se consuman, potentes sentimientos de recompensa. En la naturaleza, la agresividad y el apareamiento suelen aparecer interrelacionados y ambos están regulados por factores ambientales y estados fisiológicos similares. Por ejemplo, los machos acostumbran a ser más agresivos durante la época de celo.

Desde hace algún tiempo se sabe que el apareamiento también está controlado por la zona hipotalámica de ataque y que su estimulación con electrodos puede incitar a la cópula o a la agresión. Aplicando la tinción de Fos para resaltar las neuronas más activas, se ha descubierto que las células del hipotálamo se activan inmediatamente después de que los ratones hayan mantenido un encuentro agresivo o una cópula. Dayu Lin, cuando trabajaba en el laboratorio de Anderson antes de ejercer la docencia en la Universidad de Nueva York, implantó microelectrodos en el hipotálamo de ratones y descubrió que estas neuronas permanecían activas durante la lucha y el apareamiento; algunas durante uno de tales actos, otras en ambos. Lin y sus colaboradores consiguieron incitar a unos ratones a atacar o a copular implantando una fina hebra de fibra óptica por la que un haz de láser estimulaba a un grupo de neuronas genomodificadas para generar impulsos eléctricos en respuesta a su luz. Por medio del láser las activaron con distintas frecuencias y lograron alternar entre ambos comportamientos.

PERDER LA CABEZA

Esos nuevos hallazgos en el laboratorio distan de explicar la sinrazón de una matanza homicida. Sin embargo, la investigación

iniciada a raíz de una tragedia ocurrida hace más de medio siglo quizás impida algún día que vuelvan a publicarse titulares tan espantosos. El 1 de agosto de 1966, Charles Whitman, antiguo infante de marina de EE.UU., apuñaló y mató de varios disparos a su madre antes de acabar con la vida de su esposa, esta vez a cuchilladas. No satisfecho con eso, subió a lo alto de una torre del campus de la Universidad de Texas en Austin con un baúl militar lleno con tres cuchillos, 700 cartuchos de munición y siete armas de fuego cortas y largas. Desde allí, asesinó a 14 personas e hirió a una treintena. Dejó una nota en la que pedía que, después de su muerte, se estudiara su cerebro para averiguar si sufría algún trastorno mental.

El análisis forense reveló un pequeño tumor (glioblastoma multiforme) cerca de la amígdala. El equipo de expertos reconoció en su informe que «el tumor altamente maligno pudo haber contribuido a su incapacidad para refrenar sus emociones y acciones», pero no logró determinar de modo concluyente si el cáncer guardaba relación con los asesinatos o con su posible psicopatía. Al fin y al cabo, muchas personas sufren lesiones y tumores cerebrales y no por eso se transforman en asesinos despiadados; sin ir más lejos, los senadores de EE.UU. Ted Kennedy y John McCain sufrieron un glioblastoma multiforme.

Hasta ahora no se ha detectado ninguna anomalía en el cerebro de Stephen Paddock, el asesino en masa de Las Vegas, y es posible que no llegue a encontrarse jamás. Si se descubriera alguna lesión, resultaría imposible establecer una relación de causalidad entre el tumor cerebral y su atroz crimen. Además, las estadísticas del Estudio MacArthur para la Valoración del Riesgo de Violencia indican que las personas con trastornos mentales no tienen más probabilidades de manifestar una conducta violenta.

Lo más probable es que no se observe ninguna anomalía neurológica en el cerebro del francotirador del Mandalay Bay. Los principales factores de riesgo que predicen el comportamiento violento son la juventud, el sexo masculino, la drogadicción y un nivel socioeconómico bajo. Según una revisión realizada en 2003 por Heather Stuart, de la Universidad de Queen (Ontario), en un tercio de los actos violentos cometidos conscientemente por personas sin una enfermedad mental diagnosticada y en siete de cada 10 delitos violentos perpetrados por enfermos mentales interviene el consumo de drogas. Nuestros conocimientos acerca de cómo el alcohol o la cocaína dañan los circuitos cerebrales de la agresión dejan poco margen de duda sobre la conexión entre la toxicomanía y la violencia.

NUEVA INFORMACIÓN

El comité de expertos que en 1966 examinó el cerebro de Whitman esgrimió una razón de peso a la par que sencilla para justificar su incapacidad para vincular el tumor cerebral con el crimen: el gran desconocimiento que envolvía a este órgano. «Los escasos conocimientos de que disponemos acerca de la función orgánica del cerebro nos impiden explicar los actos cometidos por Whitman el día 1 de agosto», señalaba el informe. «Este caso representa un ejemplo paradigmático de la necesidad urgente de conocer mejor la función cerebral en relación con el comportamiento, en particular con el comportamiento violento y agresivo».

La técnica de resonancia magnética no existía en 1966 y la neurociencia apenas había iniciado su andadura. La aplicación de las técnicas modernas de exploración a la neurociencia de la agresividad está dando frutos que tal vez habrían ayudado a esclarecer el caso de Whitman.

El psiquiatra Bernhard Bogerts, de la Universidad Otto von Guericke de Magdeburgo, y sus colaboradores se han servido de resonancias magnéticas y tomografías computarizadas para examinar el cerebro de reclusos violentos y no violentos. En los primeros advirtieron una incidencia significativamente mayor de anomalías cerebrales que en los segundos o en los integrantes del grupo testigo. Por ejemplo, el 42 por ciento de los 162 presos violentos examinados mostraban al menos un área anormal, frente al 26 por ciento de los 125 no violentos y el 8 por ciento de los 52 miembros del grupo testigo. Las lesiones afectaban a la corteza prefrontal, la amígdala y otras regiones a cargo del control de la amígdala y del hipotálamo.

Los descubrimientos sobre los neurocircuitos de la agresión quizás allanen el camino para encontrar respuestas, pero también plantean nuevos interrogantes. Tanto los genes como la experiencia guían el desarrollo de los circuitos neuronales de forma diferente en cada individuo, lo que explica la variación de la intensidad y los tipos de agresión que manifiestan los seres humanos o los roedores de experimentación. La corteza prefrontal no acaba de madurar hasta cumplidos los veinte años, razón por la cual los jóvenes no deberían ser tratados como adultos con responsabilidad penal en Estados Unidos.

La lentitud del neurodesarrollo aporta cierta luz biológica a la oleada de trágicos tiroteos en centros educativos que ha conmocionado a ese país en los últimos años. En última instancia, cabría la posibilidad de reducir la propensión a la violencia a través de una regulación de los circuitos neuronales implicados por medio de fármacos, cirugía de precisión, estimulación cerebral u otros métodos.

Los nuevos datos que demuestran la presencia de anomalías neurológicas en personas encarceladas por conducta violenta suscitan cuestiones éticas acerca de la culpabilidad legal y de si la evaluación psiquiátrica de los enfermos mentales debería incluir un EEG y estudios de neuroimagen en busca de posibles lesiones. Quizá fuera esto lo que deseara Whitman mientras cargaba a cuestas su baúl y rogaba en su nota de suicidio que examinaran su cerebro después del baño de sangre que iba a cometer.

PARA SABER MÁS

Functional identification of an aggression locus in the mouse hypothalamus. Dayu Lin et al. en *Nature*, vol. 470, págs. 221-226, 10 de febrero de 2011.

Ventral premammillary nucleus as a critical sensory relay to the maternal aggression network. Simone C. Motta et al. en *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, vol. 110, n.º 35, págs. 14.438-14.443, 27 de agosto de 2013.

High prevalence of brain pathology in violent prisoners: A qualitative CT and MRI scan study. Kolja Schiltz et al. en *European Archives of Psychiatry and Clinical Neuroscience*, vol. 263, págs. 607-616, octubre de 2013.

Why we snap: Understanding the rage circuit in your brain. R. Douglas Fields. Dutton, 2016.

EN NUESTRO ARCHIVO

Raíces de la violencia. Roy F. Baumeister en *IyC*, junio de 2001.

La violencia, la otra cara de la empatía. Luis Moya Albiol en *MyC* n.º 47, 2011.

Disparé obligado por mi cerebro. Gary Stix en *MyC* n.º 67, 2014.

Ataque de locura homicida. Britta Bannenberg en *MyC* n.º 86, 2017.

Lucha animal. Gareth Arnott y Robert W. Elwood, *en este mismo número*.

COMPORTAMIENTO ANIMAL

LUCHA

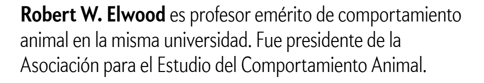


Una idea arraigada sostiene que todos los animales saben evaluar la capacidad de lucha de los rivales. Investigaciones recientes la han refutado

Gareth Arnott y Robert W. Elwood



Gareth Arnott es profesor de comportamiento y bienestar animal en la Universidad de la Reina de Belfast. Su investigación se centra en la conducta animal durante los enfrentamientos y en el bienestar animal.



Robert W. Elwood es profesor emérito de comportamiento animal en la misma universidad. Fue presidente de la Asociación para el Estudio del Comportamiento Animal.

En una escena de *África*, serie documental de la BBC de 2013, una jirafa se acerca desde la lejanía, deambulando sobre la arena dorada del Kalahari. «Es un joven macho», nos aclara el narrador, David Attenborough. El recién llegado se dirige hacia otra jirafa mientras en la banda sonora suena un tema que recuerda a los duelos de las películas del Oeste. «El viejo macho no piensa admitir a ningún rival», advierte Attenborough mientras las jirafas empiezan a enfrentarse. «Al empujarse y zarandearse, se miden las fuerzas mutuamente. El joven rival cree tener posibilidades y ataca.» Momentos después, golpea con su poderoso cuello al macho viejo. La lucha ha comenzado: una batalla sangrienta por el territorio. «Se juegan mucho. Perder significa exiliarse al desierto», añade Attenborough.

Los documentales sobre vida salvaje suelen incluir escenas de animales enfrascados en agresivas contiendas. No resulta sorprendente, ya que ofrecen escenas muy dramáticas. Pero ¿se ha preguntado el lector sobre los procesos de toma de decisiones que hay detrás de estos encuentros? Hemos tenido la suerte de poder dedicar una gran parte de nuestra carrera científica a este fascinante tema. Y nuestro trabajo ha dado como resultado algunos descubrimientos sorprendentes sobre lo que piensan los animales cuando se enfrentan con otros.

Los animales compiten por recursos como el territorio, el alimento y las parejas sexuales. En ocasiones, estos enfrentamientos son de carácter leve y nadie sufre daños físicos. Pero en otras sí que son violentos y acaban causando lesiones graves o incluso la muerte a algún contendiente. La consecuencia final es una distribución desigual de los recursos, lo que tiene efectos importantes en la eficacia reproductiva y, por tanto, impulsa la evolución. Un animal que recabe información puede salir ganando al no inmiscuirse en peleas potencialmente mortales con oponentes de más tamaño y más fuertes que él.

Los humanos somos extraordinariamente hábiles a la hora de evaluar la capacidad luchadora de los demás y aprendemos pronto a no buscar peleas con individuos más grandes que nosotros. En las pruebas de laboratorio, las personas calibran la fortaleza de un hombre después de ver brevemente fotografías de su torso o cara, o de escuchar su voz. El juicio es espontáneo: los miembros de ambos sexos lo deciden en menos de 50 milisegundos. Esta capacidad pone de manifiesto la importancia para la evolución humana de realizar evaluaciones precisas de los oponentes.

¿Son tan buenos como nosotros el resto de los animales a la hora de evaluar a los rivales? Los documentales como los que narra con tanta elocuencia Attenborough suelen describir las motivaciones de los contendientes y dan a entender que sí. Pero, en comparación, pocas especies han demostrado que realicen esta clase de evaluaciones. De hecho, nuestra propia investigación sugiere que utilizan diferente información cuando deciden si han de competir o no.

DEMOSTRACIÓN DE FUERZA

Los animales suelen protagonizar rituales antes de involucrarse en un enfrentamiento. Por ejemplo, los ciervos macho que compiten por las hembras llevan a cabo elaborados enfrentamientos con bramidos (lo que se conoce como brama o berrea), y se exhiben uno frente a otro realizando una suerte de «paseo en paralelo». Estos comportamientos se han interpretado a menudo como una forma de que cada uno muestre información al otro para que la evalúe. Si la exhibición permite resolver el enfrentamiento, no será necesario enfrascarse en una pelea en la que es muy posible salir herido o incluso morir. Según esta idea, es mejor gastar energía durante un breve espacio de tiempo para que el oponente que se perciba como el más débil pueda retirarse. Semejante conducta, denominada evaluación mutua, resulta fundamental para un modelo de la teoría de juegos sobre la lucha conocido como evaluación secuencial.

PÁGINAS PRECEDENTES: VINCE BURTON/ALAMY

EN SÍNTESIS

Durante tiempo se había creído que, en las competiciones por los recursos, todos los animales evaluaban la capacidad para la lucha de sus oponentes en comparación con la suya, una estrategia conocida como evaluación mutua.

Pero varios estudios realizados en la pasada década han revelado que numerosos animales utilizan distintas estrategias para decidir si pelear o retirarse. Muchos parecen poder evaluarse a sí mismos, pero no a sus rivales.

No está del todo claro qué determina la estrategia que seguirá un animal, pero es muy posible que la capacidad cognitiva ejerza un papel esencial. La evaluación mutua parece ser cognitivamente más compleja que otras tácticas.



EL PEZ COMBATIENTE (*Betta splendens*) sopesa la capacidad para la lucha de su oponente y se muestra más agresivo con los rivales más temibles.

JANE BURTON/NATURE PICTURE LIBRARY

La teoría de juegos es una rama de las matemáticas aplicadas que fue desarrollada inicialmente por economistas con el fin de crear un modelo sobre la toma de decisiones estratégicas de los humanos. Muy pronto, los biólogos se percataron de la utilidad de esa teoría para la biología evolutiva. John Maynard Smith y George Price fueron los primeros en aplicarla para estudiar las competiciones entre animales [*véase* «La evolución del comportamiento», por John Maynard Smith; Investigación y Ciencia, noviembre de 1978]. El modelo de evaluación secuencial propone que estas se resuelven rápido con las exhibiciones si los oponentes difieren claramente en su proeza; solo cuando ambos se asemejan se producirá la pelea. Al intensificarse la exhibición de fuerzas, esta se vuelve más costosa, pero también proporciona información más precisa, por lo que la evaluación mutua sigue en marcha durante toda la disputa. El modelo predice que cuanto más distinta sea la capacidad de lucha entre los oponentes, menos durará el conflicto. Y, de hecho, durante años, los biólogos hallaron esa relación en las contiendas de casi todas las especies que estudiaron. (Para medir la capacidad de lucha, los biólogos utilizan una medida indirecta, por lo general, el tamaño o el peso corporal.) Como resultado de todos estos trabajos, la evaluación mutua pasó a considerarse un rasgo fundamental de todos los animales.

Sin embargo, con las prisas por adherirse a tal idea, se pasaron por alto otras interpretaciones. Con la evaluación mutua, esperaríamos que los perdedores de gran tamaño perseveraran más tiempo que los pequeños en las disputas, porque la decisión del perdedor de retirarse está basada en parte en su propio tamaño o aptitud para la lucha. Y si el perdedor reúne información sobre el ganador, si este es grande entonces debería retirarse antes. Aunque disponemos de pocos estudios que examinen tales asociaciones, algunos de ellos han demostrado la existencia de la relación positiva predicha entre el tamaño del perdedor y su perseverancia. Pero había un problema: la relación entre el tamaño del ganador y la duración de la pelea no difería de una relación aleatoria. El hallazgo indica que, en estos casos, el perdedor posee información sobre sí mismo pero no sobre su oponente. O bien los animales eran incapaces de reunir esa información, o hacerlo les acarreaba un coste excesivo, o eligieron no utilizar una información que les habría ayudado a tomar decisiones óptimas respecto a la pelea. En cualquier caso, llevaron a cabo una autoevaluación, en lugar de una evaluación mutua.

Algunos de estos primeros ejemplos de autoevaluación los ofreció el laboratorio de uno de nosotros (Elwood). En 1990, el equipo documentó la existencia de esta táctica en anfípodos, animales de pequeño tamaño y parecidos a los camarones. En esta especie, los machos entablan un tira y afloja por las hembras, en el que un macho literalmente le quita una hembra de las garras a otro. No les sorprendió, pues, que los machos de mayor tamaño tuvieran más éxito que sus oponentes más pequeños a la hora de tomar posesión de una hembra e impedir que se la quitasen. Y, sin embargo, no dio la impresión de que los competidores estuvieran evaluando al otro: mientras que el peso del perdedor y la duración del enfrentamiento mostraron una sólida relación positiva, ese vínculo no existía en el caso del ganador.

La comunidad científica había desestimado en gran parte este hallazgo por considerarlo anómalo. Pero existían otros ejemplos, como el de *Metellina mengei*, una especie de araña tejedora. Durante las competiciones entre los machos para acceder a las hembras, estos dejan de agarrarse y estiran sus larguísimas patas delanteras, para, al parecer, compararlas. Para todo el mundo se trataba de un intercambio de información. Pero, una vez más, el tamaño del ganador no guardaba relación con la duración del enfrentamiento, lo que demostraba que esta exhibición no afectaba a las decisiones de las arañas. Los machos eran incapaces de evaluar al contrincante, solo a sí mismos.

El descubrimiento de que existe autoevaluación y no evaluación mutua en las arañas tejedoras motivó al zoólogo Phil Taylor, actualmente en la Universidad Macquarie, en Sídney, a ponerse en contacto con Elwood. Taylor estaba preparando un artículo sobre peleas en una especie de araña saltadora y le sorprendió descubrir también en ella autoevaluación en lugar de evaluación mutua. Este contacto condujo a una investigación conjunta para averiguar por qué, si los animales utilizan la autoevaluación, la mayoría de los análisis habían predicho que empleaban la evaluación mutua.

Taylor y Elwood llevaron a cabo una simulación por ordenador de una población de animales que entablaban competiciones y seguían las reglas de la autoevaluación, en la que el perdedor no recababa ninguna información sobre la aptitud del ganador. Los resultados revelaron una relación negativa entre la diferencia de tamaño y la duración de la competición (cuanto más distintos eran los oponentes, menos duraba la disputa), exactamente la misma que predecía la evaluación mutua. La razón es que, con una gran diferencia de tamaño, el perdedor tendría que ser necesariamente muy pequeño, mientras que con una diferencia pequeña es más probable que este sea algo más grande. De modo que, si el resultado está impulsado solo por el perdedor pero el análisis utiliza la diferencia de tamaño, entonces parecerá que apoya la idea de una evaluación mutua. En otras palabras, la herramienta que han empleado los biólogos durante muchos años para estudiar a los animales que compiten podría darnos una falsa impresión de sus aptitudes evaluadoras.

Los estudios con moscas de ojos saltones, cuyos ojos están situados en el extremo de pedúnculos similares a cuernos, ilustran el problema. Los machos compiten por el alimento y por las hembras. Un primer trabajo que se basaba en la diferencia de tamaño concluyó que comparaban sus pedúnculos para determinar quién era el ganador. Más tarde, los investigadores volvieron a analizar los datos originales utilizando el tamaño del ganador y del perdedor de forma separada respecto a la duración de la disputa. Ese enfoque mostró que el perdedor utilizaba información sobre su propio tamaño a la hora de decidir si continuaba compitiendo, pero no la relativa al ganador, porque ese factor no tenía efecto alguno sobre la duración del enfrentamiento.

Una relación positiva o no significativa entre el tamaño del ganador y la duración del escarceo, junto con una relación positiva entre el tamaño del perdedor o su aptitud para la pelea y la duración del escarceo, son indicativos de lo que llamamos «autoevaluación pura»: los participantes deciden si luchar o retirarse únicamente sobre la base de la información que tienen sobre sí mismos. Pero, si detectamos una relación negativa entre el tamaño del ganador y la duración de la competición, eso no significa necesariamente que el perdedor esté recogiendo información sobre el ganador. En lugar de ello, puede que intervenga otro proceso de toma de decisiones, lo que se conoce como evaluación acumulativa. Con ella, los animales pueden ocasionarle un coste al otro, y, cuanto mayor sea la diferencia de tamaño, mayores serán los costes para el contendiente más pequeño, que se retirará tan pronto se alcance un umbral de coste. Podría parecer que es hilar muy fino, pero existe una gran diferencia entre la evaluación acumulativa y la mutua. La primera no implica ninguna evaluación directa del oponente; el enfrentamiento se resuelve solo después de que se hayan sumado los costes. La segunda no implica la existencia de ningún umbral; más bien la información reunida sobre el oponente y uno mismo esclarece la decisión de seguir compitiendo o de tirar la toalla.

Aunque la evaluación acumulativa y la secuencial producen la misma correlación negativa entre el tamaño del ganador y la duración de la competición, disponemos de algunas herramientas para determinar cuál de los dos procesos de decisión utilizan los animales. Primero, podemos crear contiendas en el laboratorio en las que los participantes tengan igual tamaño, pero en las que el tamaño medio de ambos varíe de una contienda a otra. Si los oponentes utilizan la evaluación acumulativa, el perdedor final conoce solo su propia condición y, por ello, los perdedores grandes perseverarán durante más tiempo. En este caso, esperaríamos ver una correlación positiva entre el tamaño medio y la duración. Por el contrario, con la evaluación secuencial, la decisión se basa en la diferencia relativa de tamaño, y cuando este es equiparable no existe diferencia a pesar de los valores absolutos. Por lo tanto, si los oponentes están utilizando la evaluación secuencial, esperaríamos que no hubiera vínculo alguno entre el tamaño medio del par y la duración del enfrentamiento.

También podemos utilizar la naturaleza de la escalada y desescalada de los enfrentamientos para discriminar entre las dos estrategias de decisión. Los animales que utilizan la evaluación acumulativa deberían exhibir fases de escalada intercaladas con fases de bajo coste. En cambio, los que utilizan la evaluación secuencial deberían progresar de forma lineal desde actividades de bajo coste a otras de alto coste.

DECISIONES DIFÍCILES

La revelación de que los animales utilizan diferentes formas de evaluación cuando compiten, junto al desarrollo de protocolos



científicos que pueden discriminar entre estas estrategias, ha hecho resurgir el interés por las contiendas animales. En la última década han aparecido estudios sobre toda una serie de especies, y, gracias a ellos, han surgido numerosos ejemplos de animales que solo utilizan una de estas tres estrategias principales. Resulta interesante que la mayoría de estos muestran la autoevaluación.

Otras investigaciones han demostrado que algunas especies siguen una combinación de criterios para averiguar cuándo retirarse de un enfrentamiento y cuándo subirse al cuadrilátero. Por ejemplo, los individuos de rivulín de manglar compiten por el territorio. Un equipo dirigido por Yuying Hsu, de la Universidad Nacional Normal de Taiwán, halló que los oponentes deciden si pelear o no basándose en exhibiciones previas a la pelea. Durante esta fase, cuanto más grande era un oponente, más probable era que el contendiente más pequeño se retirara antes de que el encuentro subiera de tono y se convirtiera en pelea. Aquellos rivales cuyo tamaño se asemejaba más solían continuar la escalada y acababan peleándose. Sin embargo, parecía que no obtenían más información sobre sus oponentes después de que la pelea empezara. Esta estrategia, denominada evaluación conmutable, parece ser una mezcla de evaluación mutua seguida de autoevaluación.

Nuestros estudios con cangrejos ermitaños revelaron incluso otra forma de toma de decisiones. Estos animales rescatan los caparazones de caracoles muertos y los utilizan para proteger su delicado abdomen. También pelean para quedarse con el caparazón que porta un rival. Observamos que, durante estas tentativas de robo, los oponentes obtenían información diferente dependiendo del papel que ejercían en la contienda. Los atacantes parecían recibir menos información, o incluso ninguna, sobre los defensores de los caparazones, mientras que estos se veían influenciados por cómo peleaban los atacantes. De este modo, dentro del mismo enfrentamiento, un contendiente parecía utilizar la autoevaluación, y el otro, la evaluación mutua.

La existencia de todas estas formas de evaluación plantea una interesante pregunta: ¿qué determina la estrategia que seguirá un animal en la toma de decisiones? Un posible factor es la capacidad cognitiva. Algunos expertos sostienen que conocer la condición propia exige poca capacidad, pero integrar esa información o compararla con la condición del oponente pasa a ser un reto cognitivamente más complejo. Aunque esta idea todavía debe demostrarse de forma sistemática, se ve respaldada si echamos una rápida mirada a algunos taxones que difieren

MAXIMILIAN WEINZIERL/ALAMY (1); SUE DALY/NATURE PICTURE LIBRARY (2); ALEX MUSTARD/NATURE PICTURE LIBRARY (3)





ESTRATEGIAS DE LUCHA: El grillo doméstico (*Acheta domesticus*) se basa en la evaluación acumulativa para decidir si pelea o no (*1*). El tomate de mar (*Actinia equina*) utiliza la autoevaluación (*2*). En enfrentamientos entre cangrejos ermitaños comunes (*Pagurus bernhardus*), los atacantes emplean la autoevaluación, mientras que los defensores usan la evaluación mutua (*3*).

en su complejidad cognitiva. Las anémonas de mar poseen una red neuronal básica y el análisis de sus peleas sugiere que utilizan la autoevaluación. En el otro extremo, se ha observado que animales complejos con sistemas perceptuales más elaborados, como la sepia, emplean la evaluación mutua.

En consonancia con esta tendencia, esperamos que los mamíferos, con su cerebro voluminoso y muy desarrollado, utilicen la evaluación mutua. Pero con este grupo se han realizado muy pocos experimentos adecuados para distinguir entre los diversos modelos de evaluación. Un mamífero del que sí tenemos algunos datos experimentales es el cerdo doméstico. Uno de nosotros (Arnott) ha estado trabajando con Simon Turner, del Colegio Rural de Escocia, e Irene Camerlink, de la Universidad de Medicina Veterinaria de Viena, para estudiar la agresividad de los cerdos con vistas a mejorar el bienestar de los animales de granja. Los cerdos forman, por naturaleza, jerarquías de dominancia. Durante la cría, es una práctica rutinaria reagrupar cerdos en varias etapas del ciclo de producción. Cada vez que se procede así, surge un período de agresividad intensa hasta que los animales establecen una nueva jerarquía. Estos brotes repetidos son un problema importante para el bienestar de los animales.

Al examinar más detenidamente esta agresividad, comprobamos que los cerdos utilizaban la evaluación mutua, pero necesitaban tener experiencia previa en los enfrentamientos para poder ser competentes. El siguiente paso fue ver si podíamos proporcionarles la experiencia necesaria de tal manera que se evitara esa costosa agresividad. Para ello, decidimos experimentar manipulando el ambiente en el que se criaban los cerdos. Descubrimos que las crías que se introducían en una camada distinta a la suya antes del destete desarrollaban habilidades sociales que en el futuro les permitían acortar los enfrentamientos con individuos que no conocían. Nuestros resultados indican que la socialización en las primeras etapas de la vida puede ser una intervención eficaz y práctica que pueden adoptar los granjeros para refrenar las peleas entre cerdos adultos.

Merece también mención otro aspecto de los enfrentamientos. Aunque es probable que la capacidad cognitiva ayude a determinar qué clase de evaluación utiliza un animal, no es el único factor que interviene. El valor del recurso en disputa puede también influir en la toma de decisiones. El caparazón de los cangrejos ermitaños es un ejemplo perfecto. Durante los enfrentamientos, un cangrejo, al que llamaremos atacante (por regla general, el de mayor tamaño), se acerca y agarra el caparazón del defensor, que enseguida se esconde dentro de él. El atacante golpea vigorosamente su propio caparazón contra el del defensor una y otra vez. Los golpes finalizan con el dramático desalojo del defensor o con la retirada del atacante con las manos vacías.

Hemos descubierto que los cangrejos sopesan diversos aspectos del caparazón cuando determinan cuánto han de luchar por él. Una variable fundamental es el tamaño de este en relación con el de su propio cuerpo; el tamaño ideal del caparazón es aquel lo bastante pequeño para poder transportarlo con el mínimo coste energético, pero lo bastante grande para que le permita continuar creciendo. Los cangrejos modifican la conducta a partir de la evaluación de su caparazón y el de los oponentes. Cuando los atacantes poseen un caparazón deficiente y el de sus oponentes es óptimo, tienden a desplegar mayor agresividad y a quedarse con el de sus rivales; cuando estos últimos tienen un caparazón de poca calidad, oponen mucha menor resistencia.

Así que la próxima vez que vea un documental sobre vida salvaje en el que aparezcan animales peleándose, sabrá que en esa interacción están interviniendo numerosos factores. No obstante, en muchos casos, como en el ejemplo de las jirafas, está por determinar si los animales «se miden las fuerzas mutuamente», a pesar de lo que diga el narrador.

PARA SABER MÁS

Information gathering and decision making about resource value in animal contests. Gareth Arnott y Robert W. Elwood en *Animal Behaviour*, vol. 76, n.º 3, págs. 529-542, septiembre 2008.

Assessment of fighting ability in animal contests. Gareth Arnott y Robert W. Elwood en *Animal Behaviour*, vol. 77, n.º 5, págs. 991-1004, mayo 2009.

Animal contests. Editado por Ian C. W. Hardy y Mark Briffa. Cambridge University Press, 2013.

All by myself? Meta-analysis of animal contests shows stronger support for self than for mutual assessment models. Nelson S. Pinto et al. en *Biological Reviews*. Publicado en línea, 27 de marzo de 2019.

Vídeo de un enfrentamiento de cangrejos ermitaños en el laboratorio de los autores: **https://youtu.be/dlhzzEObnRs**

ASTRONOMÍA

EL UNIVERSO EN RAYOS X

Tras dos décadas en el espacio, el observatorio de rayos X Chandra sigue revelando nuevos secretos del cosmos

Belinda J. Wilkes

EXPLOSIÓN CÓSMICA

En el centro de la nebulosa del Cangrejo hay una estrella de neutrones muy magnetizada que rota a gran velocidad. Esta nació cuando una estrella de gran masa explotó en forma de supernova: un cataclismo que pudo verse desde la Tierra en el año 1054. Esta imagen en diferentes longitudes de onda revela los restos de aquella explosión. Los rayos X se representan en púrpura, la luz ultravioleta en azul, la visible en verde, el infrarrojo en amarillo y las ondas de radio en rojo. La emisión de rayos X, cercana a la estrella de neutrones, se halla dominada por la luz que liberan las partículas con carga eléctrica que están siendo aceleradas por la rotación del astro.

NASA/CXC/SAO (*rayos X*); NASA/STSCI (*luz visible*); NASA/JPL/CALTECH (*infrarrojo*); NSF/NRAO/VLA (*radio*); ESA/XMM-NEWTON (*ultravioleta*)

EN SÍNTESIS

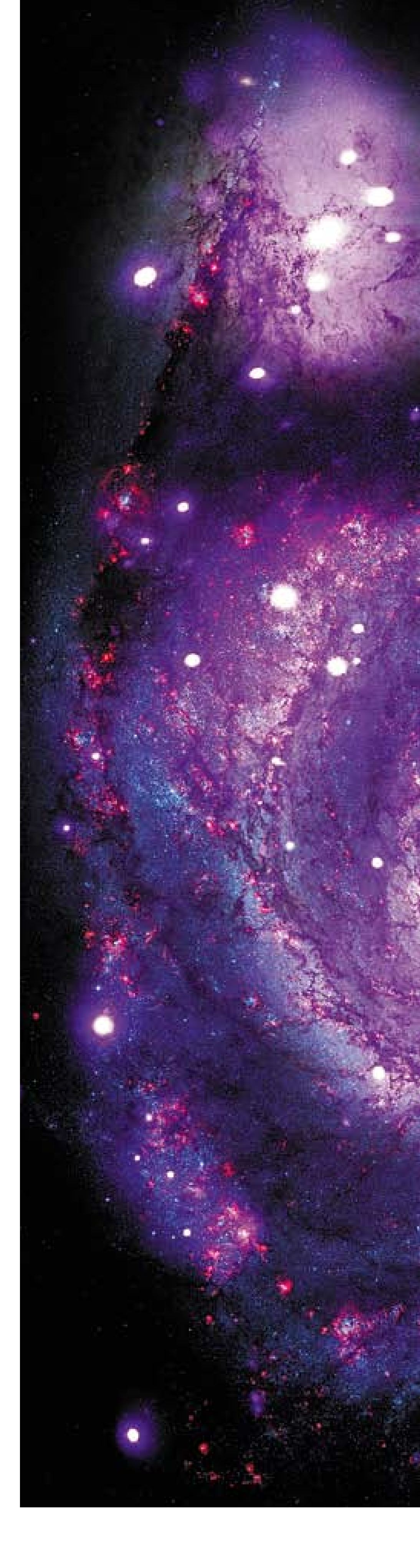
Este año se celebra el vigésimo aniversario del observatorio espacial de rayos X Chandra, de la NASA, en órbita alrededor de la Tierra desde julio de 1999.

En este tiempo el telescopio ha efectuado numerosos descubrimientos clave, como los relacionados con la física de agujeros negros supermasivos o los remanentes de supernova.

Al inicio de su tercera década, Chandra sigue plenamente operativo. Las futuras colaboraciones con otros observatorios prometen ampliar aún más nuestro conocimiento del universo violento.



Belinda J. Wilkes es astrofísica del Observatorio Smithsoniano de Astrofísica y directora del Centro Chandra de Rayos X, ambos en Cambridge, Massachusetts.



Desde su lanzamiento en 1999, el observatorio espacial de rayos X Chandra ha estado estudiando el firmamento en longitudes de onda cortas: la mejor ventana para contemplar agujeros negros colosales, cúmulos de galaxias y remanentes de supernova. El telescopio registra la posición, la energía y la hora de llegada de cada fotón de rayos X que llega a sus detectores. Esta característica, unida a unas imágenes excepcionalmente nítidas y a la capacidad de captar rayos X en un amplio abanico de energías, ha transformado nuestra manera de entender grandes misterios cósmicos, desde la materia oscura y la génesis de las estrellas hasta las propiedades de los planetas del sistema solar.

Chandra fue diseñado para resolver una pregunta clave de la astronomía de rayos X: ¿qué origina el llamado «fondo de rayos X», la radiación difusa de alta energía que parece provenir de todas las direcciones del cielo? Sin embargo, Chandra es también un telescopio de propósito general, cuyo tiempo de observación, asignado tras una convocatoria anual de propuestas, se reparte entre miles de científicos de todo el mundo que trabajan en proyectos diversos. Incluso tras dos décadas en funcionamiento, Chandra recibe entre 500 y 650 propuestas al año, equivalentes a un tiempo de observación 5,5 veces mayor que el que podemos conceder: una carrera sumamente competitiva.

En estos años, el observatorio nos ha brindado hallazgos extraordinarios. Consiguió su objetivo original cuando descubrió que, en su mayoría, el misterioso fondo de rayos X provenía de los agujeros negros supermasivos que moran en el centro de otras galaxias. También ha revelado los secretos de toda una hueste de fenómenos: las emisiones en rayos X de los potentes chorros de plasma que expulsan los agujeros negros mientras engullen materia; las brillantes auroras en la atmósfera de Júpiter; colisiones de estrellas de neutrones que también han sido detectadas en ondas gravitacionales; o incluso agujeros negros de tamaño estelar, acertadamente denominados «fuentes de rayos X ultraluminosas». Los artículos científicos basados en las observaciones de Chandra ya superan los 8000 y nuestra comunidad de usuarios cuenta con más de 4000 científicos de todo el mundo.

Me incorporé a la misión tres años antes del lanzamiento en calidad de subdirectora del grupo de asistencia técnica. Participé en la creación de la página web y los documentos que proporcionaban información a los científicos, en la primera convocatoria de propuestas y en su revisión por pares, y en la calibración del telescopio mientras se preparaba para el lanzamiento desde el Centro Marshall de Vuelos Espaciales de la NASA, en Alabama. Si bien aquella época previa al despegue fue ajetreada y estresante, no puede compararse con los meses que siguieron al lanzamiento.

Chandra cumple ahora veinte años y continúa viento en popa. Hoy ejerzo como directora del Centro Chandra de Rayos X, en Massachusetts, desde donde controlamos las operaciones del telescopio. Con la puesta en marcha de nuevos instrumentos, como el Telescopio del Horizonte de Sucesos o el James Webb, entre otros muchos, esperamos que en los años venideros Chandra continúe abriendo nuevos caminos y expandiendo nuestro conocimiento de algunos de los fenómenos más violentos del universo.





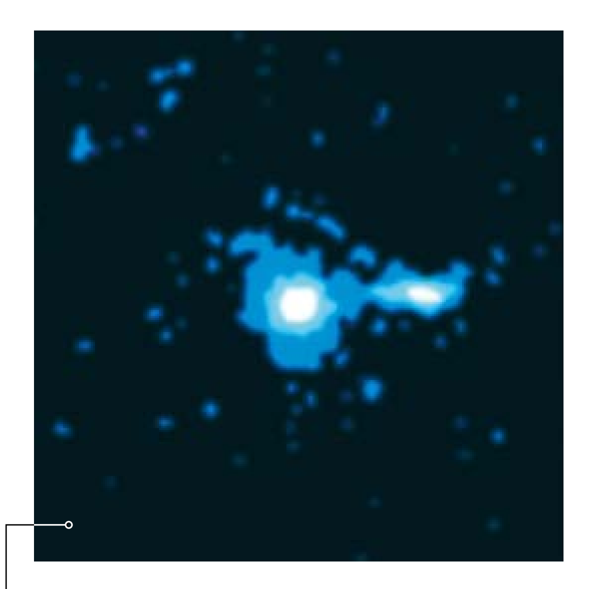
1

ESPIRALES ARREMOLINADAS

Dos galaxias en proceso de fusionarse, conocidas en conjunto como M51, o el Remolino, exhiben aquí los hermosos brazos característicos de las galaxias espirales. La imagen revela unas 400 fuentes de rayos X, la mayoría estrellas binarias situadas cerca de las regiones de formación estelar. Se cree que la interacción entre ambas galaxias ha desencadenado una oleada de nacimientos de estrellas, lo que habría dado lugar al gran número de binarias de rayos X. Las pulsaciones de uno de estos sistemas indican que uno de sus miembros es una estrella de neutrones que está acretando materia de su compañera.

La fotografía principal (*1*) se compone de los datos en rayos X tomados por Chandra (*2*) y de aquellos en el visible obtenidos por el telescopio espacial Hubble (*3*). En general, combinar datos de varios telescopios permite obtener una imagen mucho más completa de un mismo fenómeno astrofísico al posibilitar su estudio en diferentes bandas del espectro.

NASA/CXC/UNIVERSIDAD WESLEYAN/R. KILGARD ET AL. (*rayos X*); NASA/STSCI (*luz visible*)



CHORROS DE PLASMA

En sus primeros días, Chandra apuntó al cuásar PKS 0637-752: un agujero negro supermasivo en el núcleo de una galaxia distante que yo había estado estudiando una década antes con los datos del observatorio Einstein, de la NASA. El agujero negro está absorbiendo grandes cantidades de materia. A medida que cae, ese material se calienta tanto que eclipsa a los 100.000 millones de estrellas de la galaxia.

La luz que se extiende a la derecha de la imagen era inesperada, y en un primer momento temimos que se debiese a una avería en el telescopio. Sin embargo, Chandra había detectado las emisiones en rayos X de un chorro de plasma expulsado por la materia que se precipitaba hacia el agujero negro. Ese chorro ya se había divisado en ondas de radio, pero no esperábamos verlo en rayos X. Las imágenes de Chandra han dado lugar a importantes progresos en la comprensión de la física de los agujeros negros supermasivos.

NASA, CXC Y SAO

MATERIA OSCURA

Entre los resultados más célebres de Chandra se encuentra esta imagen del cúmulo de Bala, formado por dos cúmulos de galaxias en colisión. La fotografía combina datos de Chandra, de los telescopios Magallanes y del telescopio espacial Hubble. El gas caliente se ve en rayos X (*rosa*) y las galaxias se observan en luz visible (*blanco*). A partir de la luz visible puede inferirse la distribución de materia oscura (*azul*) debido a la distorsión gravitatoria inducida en las imágenes de las galaxias, un efecto conocido como lente gravitacional.

Esa separación entre el gas caliente y la materia oscura proporcionó el primer indicio directo de la presencia de esta última. También demostró que la materia oscura no interacciona ni consigo misma ni con la materia ordinaria, pues se mueve con las galaxias y no «ve» el material circundante. Por el contrario, el gas caliente sí interacciona y se frena, lo que da lugar a la forma de bala que da nombre a los cúmulos.

NASA/CXC/CFA/M. MARKEVITCH ET AL. (*rayos X*); NASA/STSCI/ MAGALLANES/UNIVERSIDAD DE ARIZONA/D. CLOWE ET AL. (*luz visible*); NASA/STSCI/ESO WFI/MAGALLANES/UNIVERSIDAD

CERCA DE CASA

Además de localizar agujeros negros supermasivos y cúmulos de galaxias lejanos, Chandra ha logrado asombrosos descubrimientos en nuestro propio sistema solar. Estas imágenes de Júpiter muestran la emisión en rayos X de las auroras de los polos norte (*1*) y sur (*2*), una característica nunca vista en ningún otro mundo de nuestro sistema planetario. Se cree que los rayos X se generan cuando los campos magnéticos canalizan partículas desde el anillo ecuatorial que rodea al planeta. Se espera que los datos obtenidos en 2019 por Chandra y por la sonda Juno, en órbita alrededor del gigante gaseoso, proporcionen información detallada del proceso. Desde mi cargo como directora, he podido facilitar estas observaciones concediendo tiempo discrecional a estos estudios.

NASA/CXC/UCL/W. DUNN ET AL. (*rayos X*); NASA/JPL-CALTECH/SWRI/MSSS/GERALD EICHSTÄDT Y SEÁN DORAN (*luz visible, polo sur*); NASA, JPL-CALTECH, SWRI Y MSSS (*luz visible, polo norte*)



1

2

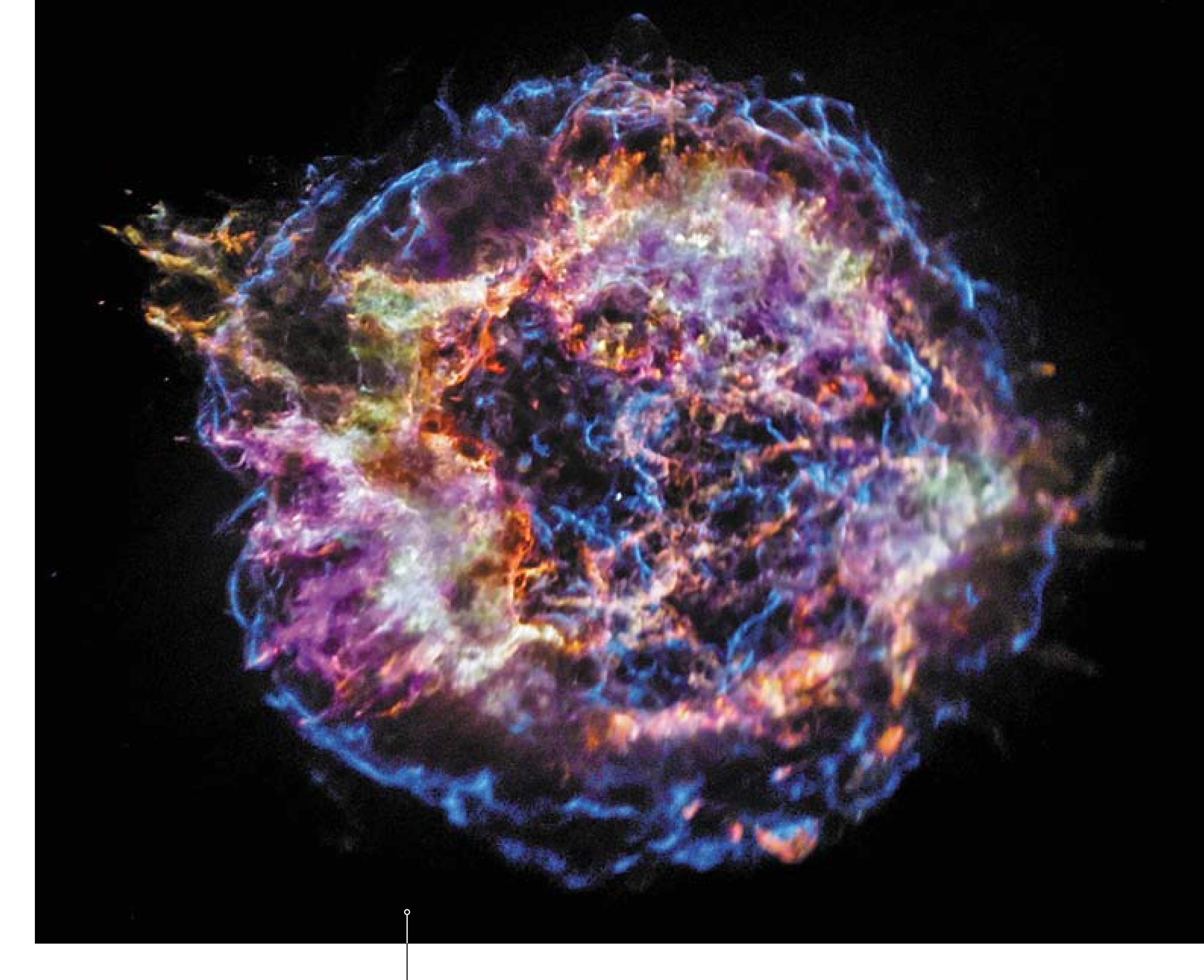




ESTRELLAS RECIÉN NACIDAS

Los más de 1400 puntos azules y naranjas de la imagen corresponden a estrellas que acaban de formarse en esta densa nebulosa, la cual puede observarse a simple vista en la espada de la constelación de Orión. La visión en rayos X de Chandra puede penetrar en las espesas nubes de gas y polvo y revelar las estrellas nacientes, ocultas a los telescopios tradicionales de luz visible. Estos astros jóvenes presentan temperaturas muy elevadas y son objeto de violentos procesos: su gravedad atrae materia, los campos magnéticos la aceleran y los vientos estelares vuelven a expulsarla a medida que la estrella nace y comienza a brillar.

NASA/CXC/UNIVERSIDAD ESTATAL DE PENSILVANIA/E. FEIGELSON/K. GETMAN ET AL. (*rayos X*); NASA/ESA/STSCI/M. ROBBERTO ET AL. (*luz visible*)



PRIMERA LUZ

La primera imagen oficial de Chandra, un retrato del icónico remanente de supernova Casiopea A, demostró de inmediato la gran resolución espacial del telescopio: en ella se vio por primera vez la largamente buscada estrella de neutrones del centro de la nebulosa. Este astro compacto fue lo que quedó cuando, en un evento cuya luz alcanzó la Tierra hace 340 años, una estrella mucho mayor que el Sol explotó en forma de supernova. Esta imagen combina los datos obtenidos por Chandra a lo largo de varios años, a lo largo de los cuales ha ido revelando más y más detalles de la compleja estructura. A ello se suma la resolución energética del telescopio: esta ha permitido identificar distintos elementos químicos que se crearon en el interior de la estrella y que fueron eyectados durante la explosión, como silicio (*rojo*), azufre (*amarillo*), calcio (*verde*) y hierro (*púrpura*). El anillo exterior de color azulado corresponde a la emisión de partículas de alta energía aceleradas por la onda de choque de la explosión, un aspecto también descubierto por Chandra.

NASA/CXC/SAO

PARA SABER MÁS

Exploring the extreme: 20 years of Chandra. Centro Chandra de Rayos X. **https://chandra.si.edu/20th**

EN NUESTRO ARCHIVO

El universo maduro. Amy J. Barger en *IyC*, marzo de 2005.

por H. Joachim Schlichting



H. Joachim Schlichting es exdirector del Instituto de Didáctica de la Física de la Universidad de Münster.

¿Qué ocurriría si se fundieran todos los icebergs?

El hielo flotante se hunde menos en el agua salada que en la dulce. Como consecuencia, la fusión de los icebergs sí aumenta ligeramente el nivel del mar

En la era del calentamiento global, se habla a menudo de cómo influiría en el nivel del mar la desaparición del hielo del planeta. Por lo general, esas discusiones se limitan al agua de deshielo o al hielo que llega al mar desde tierra firme. Muchos asumen implícita o incluso explícitamente que el hielo que ya está flotando en el agua no provoca ningún aumento en el nivel del mar al derretirse. El argumento habitual es que, al fin y al cabo, un iceberg contiene tanta agua congelada como líquido desplaza, como si se tratara de un juego de suma cero.

Un sencillo experimento sirve para ilustrarlo. Pongamos un cubito de hielo en un vaso lleno de agua y esperemos a que se descongele. Podremos comprobar

SOLO CERCA DEL 10 POR CIENTO del volumen de un iceberg sobresale por encima del nivel del mar. Se calcula que el hielo marino presente en el planeta desplaza unos 660.000 kilómetros cúbicos de agua.

GETTY IMAGES/GLOBAL_PICS/ISTOCK

que, a medida que lo hace, el nivel del agua no cambia. Incluso cabría preguntarse si realmente hacía falta llevar a cabo semejante experimento. ¿No se desprende este resultado de las propiedades conocidas del agua cerca de la transición entre ambos estados de agregación?

El hielo flota porque, a diferencia de la mayoría de las sustancias, el agua no aumenta de densidad al enfriarse, sino que por debajo de cuatro grados Celsius se dilata de nuevo. Entre las moléculas se forman los llamados puentes de hidrógeno, que van dando lugar a estructuras cada vez más complejas y que ocupan un espacio mayor.

Esto ya sucede en parte en el líquido, y en el cristal ese orden expansivo es perfecto. Mientras que un centímetro cúbico de agua líquida a cero grados Celsius posee una masa de aproximadamente un gramo, el mismo volumen de hielo solo pesa unos 0,92 gramos. Eso hace que el cubito de hielo no se sumerja completamente en el agua, sino que alrededor del 9 por ciento de su volumen sobresalga del líquido. Por el contrario, una masa de cera sólida sí que se hunde en la cera líquida.

Agua dulce y agua salada

El principio de Arquímedes nos ayuda a entender el fenómeno de manera cuantitativa. Sobre un objeto sumergido en un fluido actúa un empuje vertical y hacia arriba igual al peso del fluido desalojado. Eso implica que el peso del fluido desplazado por un cuerpo que flota es igual al peso de dicho cuerpo. En nuestros razonamientos podemos usar la masa del objeto en cuestión, ya que el peso es el producto de la masa por la aceleración de la gravedad, la cual es constante.

Si introducimos un cubito de hielo de 10 gramos (y por tanto con un volumen de aproximadamente 10/0,92 = 10,9 centímetros cúbicos) en un vaso de agua, el principio de Arquímedes nos dice que desplazará exactamente 10 gramos de agua. A medida que se derrite, su densidad aumenta y su volumen disminuye, hasta que acaba coincidiendo con el del agua desalojada originalmente. Por consiguiente, el nivel del líquido no cambiará.

Sin embargo, en el caso de los icebergs la situación es distinta, ya que flotan en agua salada. Así que debemos modificar nuestro experimento, llenando el vaso con agua salada en lugar de con agua dulce.

Un cubito de hielo de 10 gramos desplazará de nuevo una masa de 10 gramos de agua salada. Pero como esta tiene una densidad mayor (en las aguas marinas superficiales, la densidad media es de 1,026 gramos por centímetro cúbico), el volumen desplazado será menor, de unos 9,7 centímetros cúbicos. Por tanto, el cubito sobresaldrá un poco más. Al derretirse, añadirá al líquido sus 10 centímetros cúbicos de agua, así que el volumen crecerá alrededor de un 2,6 por ciento y, en consecuencia, el nivel del agua aumentará.

Este efecto es más acusado cuanta más sal contenga inicialmente el agua, algo que podemos comprobar con facilidad en un experimento casero. En mi caso, introduje un bloque de hielo de 90 gramos en un vaso cilíndrico de 5,7 centímetros de diámetro lleno de agua salada con una densidad de 1,2 gramos por centímetro cúbico (100 gramos de sal completamente disueltos en 500 gramos de agua). Tras derretirse el hielo, la diferencia en la altura del líquido fue de 1,3 milímetros. (Dado que el agua humedece el vidrio, se forma un menisco, por lo que en las mediciones tomé como referencia su borde inferior.)

Tal aumento coincidió, dentro de la precisión experimental, con lo que cabía esperar a partir de los cálculos. Como vemos, se trata de un efecto menor, a pesar de que la concentración de sal era considerablemente mayor que en el agua marina.

Aumento del nivel del mar

Pero ¿puede aplicarse todo esto al aumento del nivel del mar debido a la fusión de los icebergs? Después de todo, hasta ahora solo hemos considerado el caso en que tenemos hielo de agua dulce flotando en agua salada.

Sin embargo, también los icebergs se componen fundamentalmente de agua dulce. La sal marina no se incorpora a la red cristalina durante la congelación, sino que casi toda ella acaba cediéndose al medio marino. Solo una pequeña parte se acumula en bolsas de salmuera, lo que aumenta ligeramente la densidad del iceberg. Con todo, este fenómeno solo introduce correcciones muy leves.

Por tanto, si se fundiese todo el hielo que flota en los océanos, sí que habría algunas repercusiones, al menos en teoría. Según los cálculos que podemos encontrar en algunos artículos científicos, el volumen total de agua desplazada por el hielo asciende a 660.000 kilómetros cúbicos. Por su parte, el agua de mar se distribuye en una superficie de unos $3,6 \times 10^8$ kilómetros cuadrados. Si pasamos por alto las variaciones del litoral, estas cifras nos darían como resultado un aumento del nivel del mar de cuatro centímetros. Este valor puede parecer pequeño comparado con otras alteraciones en el nivel del mar discutidas en relación con el cambio climático, pero desde luego no es despreciable. IyC

PARA SABER MÁS

The melting of floating ice raises the ocean level. Peter D. Noerdlinger y Kay R. Brower en *Geophysical Journal International*, vol. 170, págs. 145-150, julio de 2007.

EN NUESTRO ARCHIVO

El empuje de Arquímedes. Roland Lehoucq y Jean-Michel Courty en *IyC*, agosto de 2001.

Diez cuestiones clave sobre el hielo y la nieve. Thorsten Bartels-Rausch en *IyC*, septiembre de 2013.

¿Se está desmoronando la Antártida? Richard B. Alley en *IyC*, septiembre de 2019.

José Manuel Sánchez Ron es miembro de la Real Academia Española y catedrático de historia de la ciencia en el Departamento de Física Teórica de la Universidad Autónoma de Madrid.



HISTORIA DE LA CIENCIA

Von Humboldt: el científico universal

Movido por un profundo deseo de comprender el mundo, Alexander von Humboldt recorrió el planeta para estudiar la naturaleza y los pueblos

José Manuel Sánchez Ron

Con raras excepciones, los científicos se especializan en una sola disciplina; más aún, en una parcela de ella. Una de esas excepciones fue Alexander von Humboldt (1769-1859), de cuyo nacimiento se cumple este año el 250º aniversario. Su manera de estudiar la naturaleza no conocía fronteras. Fue una peculiar combinación de viajero, aventurero, científico, político, antropólogo e incluso filósofo. Quería conocer y comprender el mundo terrestre —sin dejar de lado el «cósmico»—, pero de una forma global, no especializándose en ningún pequeño rincón de ella, por mucho que su importancia fuese fundamental. Tuvo, además, todo para brillar en la vida. Todo, porque nació en el seno de una familia acaudalada perteneciente a la pequeña nobleza prusiana, que le permitió recibir una buena educación, aunque bastante solitaria al depender esta, al principio sobre todo, de tutores en la mansión familiar. Soledad atemperada por la compañía de su hermano, «el otro gran Humboldt»: Wilhelm von Humboldt (1767-1835), estadista, educador y lingüista recordado especialmente por haber fundado la Universidad de Berlín.

Autobiografía para Carlos IV

Uno de los episodios más importantes de la vida de Alexander von Humboldt fue el viaje que realizó por América del Sur durante cinco años: desde el 5 de junio de 1799, cuando el barco en el que se trasladó zarpó del puerto de La Coruña, hasta el 1 de agosto de 1804, cuando llegó a Burdeos. Sin embargo, para viajar por los territorios americanos de la corona española, los extranjeros necesitaban un permiso real. Gracias a semejante obligación disponemos de una pequeña autobiografía del entonces joven Humboldt, contenida en la carta que desde Aranjuez dirigió al rey de España, Carlos IV, el 11 de marzo de 1799, pidiéndole permiso para viajar a los reinos españoles en América. De ella son los siguientes pasajes:

Después de haber disfrutado de una educación muy cuidada en la casa paterna y de la enseñanza de los sabios más distinguidos de Berlín, terminé mis estudios en las universidades de Gotinga y Fráncfort. Destinado entonces a la carrera de hacienda, estuve durante un año en la Academia de Comercio de Hamburgo, establecimiento dedicado tanto a la instrucción de negociantes como a la de personas que debían servir al Estado en la dirección del comercio, de los bancos y de las manufacturas. El éxito poco merecido que tuvo mi primera obra sobre las montañas basálticas del Rin hizo desear al jefe de nuestras minas [...] que me ofreciese al servicio de su departamento. Hice por entonces un viaje de mineralogía y de historia natural por Holanda, Inglaterra y Francia, bajo la dirección de George Forster, célebre naturalista que había dado la vuelta al mundo con el capitán Cook. A él debo los pocos conocimientos que poseo. A la vuelta de Inglaterra aprendí la práctica de la minería en Freiberg y en Harz.

Algunos descubrimientos que hizo entonces sirvieron para que el rey lo enviase a Polonia y al sur de Alemania para estudiar minas de sal gema, misión en la que también se distinguió y que le reportó el nombramiento de director de minas de los Margraviatos de Franconia (una de las regiones de Baviera). Sus obligaciones en ese cargo le permitieron «visitar la alta cadena de los Alpes, el Tirol, la Saboya y el resto de la Lombardía».



FRIEDRICH HEINRICH ALEXANDER VON HUMBOLDT. Grabado de D. J. Pound (1859) a partir de una pintura de C. Begas (1840).

Pero también se vio involucrado en misiones de índole política: cuando las tropas francesas avanzaron hacia Franconia, fue enviado al cuartel general de Moreau para negociar sobre la neutralidad de algunos príncipes del Imperio, cuya protección había asumido el rey. Pero él deseaba hacer otras cosas, vivir una vida diferente:

Teniendo un ardiente deseo de ver otra parte del mundo y de verla con la referencia de la física general, de estudiar no solamente las especies y sus caracteres, estudio que se ha hecho casi exclusivamente hasta hoy día, sino la influencia de la atmósfera y de su composición química sobre los cuerpos organizados; la formación del globo, las identidades de las capas (estratos) en los países más alejados unos de otros, en fin, las grandes armonías de la naturaleza, tuve el deseo de dejar por algunos años el servicio del rey y de sacrificar una parte de mi pequeña fortuna al progreso de las ciencias. Solicité mi licencia, pero S. M., en lugar de concedérmela me nombró su Consejero Superior de Minas, aumentando mi pensión y permitiéndome hacer un viaje de historia natural.

No aceptó, sin embargo, la pensión y comenzó a prepararse para los viajes que deseaba emprender. Reunió «una escogida colección de instrumentos de astronomía y de física, para poder determinar la posición astronómica de los lugares, la fuerza magnética, la declinación y la inclinación de la aguja imantada, la composición química del aire, su elasticidad, humedad y temperatura, su carga eléctrica, su transparencia, el color del cielo, la temperatura del mar a una gran profundidad, etcétera». También realizó «algunos descubrimientos sorprendentes sobre el fluido nervioso y la manera de estimular los nervios por agentes químicos, aumentando y disminuyendo la irritabilidad a voluntad», lo que le llevó a estudiar anatomía en la Universidad de Jena durante cuatro meses. Y trabajó durante cinco meses con los químicos de París.

A punto estuvo de viajar alrededor del mundo, invitado por el Ministerio de Marina francés, pero el proyecto fracasó por falta de fondos. «Decidí entonces», explicaba a Carlos IV, «irme a África para estudiar el monte Atlas; aguardé durante dos meses a mi embarcación en Marsella, pero los cambios del sistema político ocurridos en Argel me hicieron renunciar a este proyecto y tomé el camino de la península para solicitar la protección de S. M. Católica para un viaje a América, cuyo éxito colmaría mis deseos».

Gracias a sus buenas relaciones, Humboldt consiguió el permiso del rey. En América, viajando sin descanso de un lugar a otro, atravesando ríos y bosques casi impenetrables, escalando montañas, asomándose a los cráteres de volcanes, familiarizándose con la flora, la fauna y los habitantes indígenas, tuvo la oportunidad de realizar la gran visión de la naturaleza que seguramente se formó influido por Goethe, el literato amante de las ciencias, con quien se relacionó en Jena. Algo de esa visión aparece en una carta que dirigió el 24 de enero de 1796 a Marc-Auguste Pictet (1752-1825), físico, químico y astrónomo de Ginebra:

Me pedís que detalle los pequeños descubrimientos que he tenido la suerte de realizar sobre diversos objetos de botánica, de física y de fisiología general; me inspira usted coraje persuadiéndome de que mis flojos ensayos no serán olvidados del todo [...] Tengo demasiada vanidad para no ceder a sus peticiones, y no dudo en enviaros estas líneas, rogándole que las reciba con esa indulgencia que es siempre la prerrogativa del verdadero mérito. Ha sido después de seis años, tras el viaje que hice a Inglaterra con George Forster, filósofo amable [...], que no he cesado de ocuparme de observaciones físicas. He tenido la suerte de recorrer como minero una gran parte de las montañas de Europa; he estudiado la naturaleza bajo los puntos de vista más diferentes; he concebido la idea de una física del mundo.

«He concebido la idea de una física del mundo», decía, una frase que puede interpretarse en el sentido de que deseaba describir la naturaleza prestando especial atención a las interrelaciones existentes en ella entre las diferentes fuerzas físicas. Y en ningún lugar u ocasión mostró más y mejor lo que quería decir que en su viaje a América, en el que le acompañó el botánico francés Aimé Bonpland (1773-1858). Allí, los talentos de Alexander von Humboldt florecieron. Habitualmente, la ciencia se hace en el laboratorio (efectuando experimentos) o en el despacho (construyendo teorías). Humboldt, por el contrario, la hizo en el campo, midiendo todo lo que podía medir (presiones atmosféricas, temperaturas, altitudes, coordenadas geográficas, campos magnéticos...), recogiendo plantas (recolectó unas 60.000, de las cuales 6300 eran desconocidas en Europa) o estudiando pueblos y sus costumbres. Hizo, en una palabra, de la naturaleza su laboratorio. Se movió con igual soltura y afán en los dominios de la física terrestre y del aire, de la geología, la meteorología, la mineralogía, la geografía, la botánica, la etnografía, la política y la economía. Las monografías que publicó sobre Cuba y México constituyen un ejemplo particularmente transparente de su versatilidad e interdisciplinariedad: fueron los primeros estudios geográficos de esos lugares en términos de ciencia, política y economía.

América

El camino hacia América pasaba obligatoriamente por las islas Canarias. Llegó a Tenerife dos semanas después de haber partido de La Coruña. El 25 de junio (1799), desde Puerto Orotava escribía a su hermano:

¡Regresé del pico [el Teide] ayer, a la noche! ¡Qué espectáculo! ¡Qué gozo! Fuimos hasta el fondo del cráter; posiblemente más lejos que cualquier otro naturalista [...]. No hay mayor peligro, pero uno se fatiga por el calor y el frío; en el cráter los vapores de azufre hirviendo agujeraban nuestra ropa y las manos se agarrotaban a 2 grados Réaumur. ¡Dios, que sensación a esta altura (1500 pies)!; sobre nosotros, la bóveda del cielo azul intenso; viejas corrientes de lava al pie; todo alrededor esta escena de desolación (3 millas cuadradas de piedra pómez) rodeada de bosques de laureles; abajo, a lo lejos, los viñedos entre los cuales ramilletes de plátanos se extienden hasta el mar, lindos pueblecitos sobre la costa, el mar y todas las siete islas, entre las cuales La Palma y Gran Canaria poseen volcanes muy altos, que aparecían por debajo de nosotros como en un mapa geográfico. El cráter en el cual estábamos no exhala más que vapores sulfurosos. La tierra está a 70 grados Réaumur. De las laderas sale la lava. También se encuentran los pequeños cráteres como los que iluminaron toda la isla hace muchos años. Se oyó en esa época, durante dos meses, un ruido

de descargas de artillería subterránea y piedras del tamaño de una mano fueron lanzadas por el aire hasta 4000 pies.

Treinta y dos años después, Charles Darwin llegó a Tenerife en el *Beagle*, al comienzo de su celebrado viaje. Y quiso hacer lo mismo que Humboldt: ascender el Teide. Pero les impidieron desembarcar. Se puede apreciar el desengaño que sufrió entonces en una carta que escribió entre el 8 de febrero y el 1 de marzo de 1832 a su padre desde Bahía, en Brasil:

El 6 de enero por la tarde llegamos al puerto de Santa Cruz. Me sentía ya moderadamente bien [había sufrido durante la navegación intensos mareos] y me imaginaba todas las delicias de fruta fresca creciendo en los bellos valles y leyendo las descripciones de Humboldt de las gloriosas vistas de las islas. Podrá imaginarse mi decepción cuando un pequeño hombre pálido nos informó de que debíamos guardar una estricta cuarentena de 12 días. Se produjo un silencio mortal en el barco, hasta que el capitán gritó «Up jib!», y abandonamos este lugar largamente deseado.

Las cartas que Humboldt escribió desde América abundan en todo tipo de detalles. Como su ascensión al Chimborazo, el volcán del Ecuador, cerca de Quito, que intentó los días 22 y 23 de junio de 1802. Fue acompañado de Bonpland y un amigo ecuatoriano, además de un pequeño grupo de ecuatorianos, la mayor parte porteadores, ya que, como siempre, iba cargado de instrumentos científicos para sus medidas. Llegaron hasta los 5917 metros, a escasos 300 metros de la cumbre, pero separados de ella por una inmensa grieta, que no tuvieron fuerzas para rodear. Fue terrible: mareados por la falta de oxígeno, los ojos inyectados en sangre, las manos casi congeladas, las encías sangrando, luchando contra la niebla, la nieve y las rocas. Más tarde, el 25 de noviembre, desde Lima, describió al astrónomo Jean Baptiste Delambre algo de aquella odisea (utilizaba una unidad de longitud empleada entonces sobre todo por los franceses, la toesa, equivalente a unos 1,949 metros):

Hasta ahora se ha creído en Quito que 2470 toesas era la mayor altura que los hombres podían resistir, a causa de la rarefacción del aire [...]. En la expedición que realicé el 23 de junio de 1802 al Chimborazo, hemos probado que con paciencia se puede aguantar una mayor rarefacción del aire. Llegamos a 500 toesas más arriba que La Condamine (en el Corazón), llevamos instrumentos al Chimborazo hasta 3031 toesas, viendo descender el mercurio en el barómetro 13 pulgadas 11,2 líneas, el termómetro estaba a 1,3 grados por debajo de cero. Nos sangraban los labios. Nuestros indios nos abandonaron como de costumbre. El ciudadano Bonpland y M. de Montúfar, hijo del marqués de Selvalegre, de Quito, fueron los únicos que resistieron. Todos sentimos un malestar, una debilidad, ganas de vomitar que seguramente provienen de la falta de oxígeno de estas regiones y de la rarefacción del aire. No encontré más de 0,20 [por ciento] de oxígeno a esta inmensa altura. Una grieta tremenda nos impidió llegar a la cima del Chimborazo para la cual nos faltaban 236 toesas solamente.

En América, como Darwin luego, se enfrentó a peligros e incomodidades. Véase, en este sentido, lo que escribía al capitán general de Caracas, Guevara Vasconcelos, desde Nueva Barcelona el 23 de diciembre de 1800:

Es así que hemos terminado un viaje de más de novecientas leguas, contando desde nuestra partida de Caracas. Durante más de tres meses hemos dormido en las orillas de los ríos en los bosques más espesos, oyendo siempre los rugidos de los tigres y defendiéndonos contra sus ataques mediante fogatas encendidas alrededor de nuestras hamacas. La humedad del aire pudría todas las provisiones que llevábamos, de modo que nuestro alimento consistió en bananas, arroz, pescado y casabe más duro que una piedra. Los mosquitos, los zancudos, una cantidad enorme de chinches y hormigas irritaban nuestra sangre de una manera tanto más insoportable cuanto que, en caso de que nos encontráramos a orillas de un río caudaloso y quisiéramos bañarnos para refrescar nuestros cuerpos, no nos atrevíamos a intentarlo a causa de la ferocidad de los caimanes, las rayas, los caribes, los gimnotos, las culebras de agua y las boas.

De nuevo en Europa

Cuando regresó a Europa de América era aún un hombre joven (estaba a punto de cumplir treinta y cinco años). Tenía toda una vida por delante, que pasó bien en su amado París y en Berlín, siempre sirviendo, en teoría al menos, a Prusia como diplomático (sus viajes americanos le habían dejado en una posición económica que le obligaba a recibir algún salario fijo). Aunque la fama lo rodeó crecientemente, no se dejó desviar de lo que para él era más que un trabajo, un proyecto de vida. Pero ya nada fue lo mismo. Incluso el viaje que hizo a Rusia para participar, en 1829, en una expedición a los Urales con fines mineros y geológicos, se pareció muy poco al americano. Y no pudo llevar a cabo dos proyectos muy queridos para él: explorar el Himalaya y viajar al interior de Asia; parece que la Compañía de las Indias Orientales se opuso a este proyecto, temerosa de que el viaje se emplease para descubrir nuevos recursos naturales de los que se beneficiasen otros.

De esa «segunda» etapa de su vida nada brilla más que una obra a cuya escritura se dedicó con pasión: *Cosmos*. El primer volumen apareció en Alemania en abril de 1845 (la muerte le llegó antes de ver publicado el quinto volumen). «Es el trabajo de mi vida», escribió al astrónomo y matemático Friedrich Wilhelm Bessel el 14 de julio de 1833, «debería reflejar mi concepción y visión de las relaciones sin explorar que se dan en la naturaleza, según mis propios experimentos y lo que con tanto trabajo he averiguado a través de lecturas en muchos idiomas». En el prefacio, firmado en Postdam en noviembre de 1844, Humboldt dejó claro qué pretendía con esta magna obra: «En *Cosmos* [...] he procurado patentizar que no es absolutamente inconciliable la descripción ajustada y exacta de los fenómenos, con la pintura viva o animada de las imponentes escenas de la creación». IyC

PARA SABER MÁS

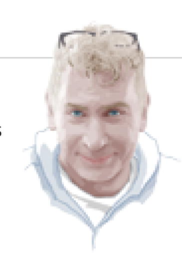
Humboldt. Correspondance scientifique et littéraire. Dirigido por M. de la Roquette. E. Ducrocq, Librarie, París, 1865.

Cartas americanas, Alejandro de Humboldt. Biblioteca Ayacucho, Caracas, 1980.

Briefe aus Amerika, 1799-1804, Alexander von Humboldt. Diridigo por Ulrike Moheit. Akademie Verlag, Berlín, 1993.

por Bartolo Luque

Bartolo Luque es físico y profesor de matemáticas en la Universidad Politécnica de Madrid. Sus investigaciones se centran en la teoría de sistemas complejos.



La función de Lambert

Las extraordinarias propiedades de una función ubicua que debería ser considerada elemental

Al resolver problemas de física, química o ingeniería, es habitual encontrarse con ecuaciones trascendentes como

$$ye^y = a\ ,$$

donde y es la incógnita y a una constante. Estas ecuaciones no pueden resolverse en términos de funciones elementales como polinomios, exponenciales, logaritmos o funciones trigonométricas. ¿Cómo se procede en estos casos?

Por supuesto, siempre podemos intentar hallar una solución numérica con ayuda de un ordenador. Pero si introducimos la ecuación anterior en un programa de cálculo simbólico, este nos devolverá la siguiente solución:

$$y = W(a)\ .$$

¿Qué es esa $W(x)$? Se trata de la función W de Lambert, la cual se define como la solución de la ecuación trascendente

$$W(x)e^{W(x)} = x\ .$$

Observemos que $W(x)$ es una función elemental implícita, puesto que la ecuación que la define está formada por funciones elementales. Y del mismo modo que el logaritmo es la inversa de la exponencial, $W(x)$ no es más que la inversa de

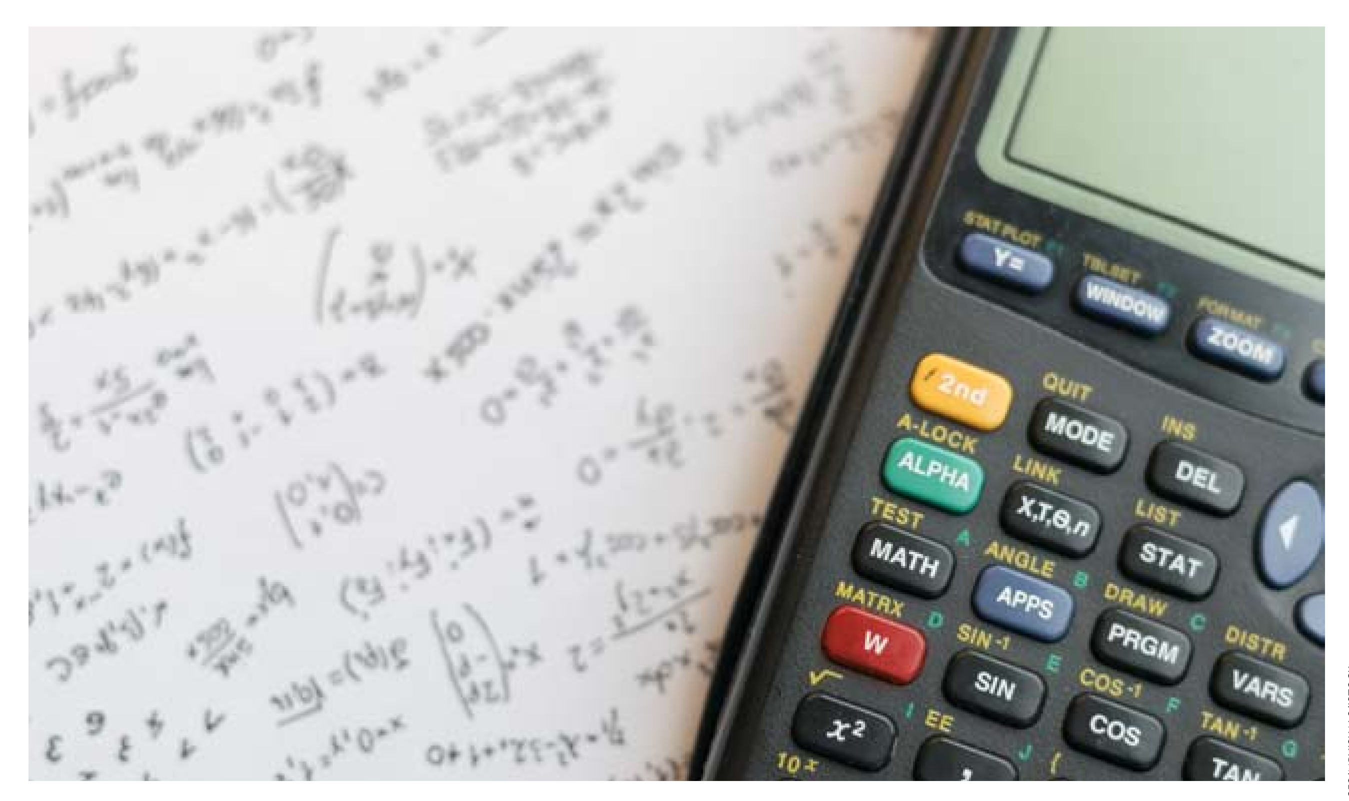
$$x(W) = We^W\ ,$$

la cual podemos entender como una generalización de la exponencial.

A partir de la definición implícita de W podemos determinar fácilmente el valor de algunos argumentos, como $W(0) = 0$ o $W(-1/e) = -1$. Pero ¿qué aspecto tiene la gráfica de $W(x)$?

Esta última pregunta no es difícil de responder. Para ello basta con comenzar dibujando la gráfica de la función inversa, $x(W) = We^W$. Al hacerlo veremos que tiende asintóticamente a 0 por la izquierda y a infinito por la derecha, al igual que la exponencial. Sin embargo, observamos también una característica novedosa: $x(W)$ tiene un mínimo en $W = -1$, donde $x(W) = -1/e$ (*véase la figura 1*).

Para dibujar la gráfica de $W(x)$ no tenemos más que reflejar la gráfica anterior



¿UNA NUEVA FUNCIÓN ELEMENTAL? La función *W* de Lambert fue descubierta en el siglo XVIII por Johann Lambert y popularizada por Leonhard Euler. Aunque aparece en todo tipo de problemas, sigue sin ser considerada una función elemental, como el seno o el logaritmo.

GETTY IMAGES/MPVISUALS/ISTOCK

con respecto al eje $x = W$ (*véase la figura 2*). Vemos así que $W(x)$ no está definida para los valores $x < -1/e$, tal y como ocurre con el logaritmo para valores negativos del argumento. Eso quiere decir que, para $x < -1/e$, nuestra ecuación $We^W = x$ carece de soluciones reales.

Para $x \geq 0$ hay asegurada una única solución real, como ocurre con el logaritmo para valores positivos del argumento. Sin embargo, debido a la presencia del mínimo de $x(W)$ en $W = -1$, vemos que en el intervalo $-1/e < x < 0$ existen dos valores posibles de $W(x)$; es decir, la función no está univaluada. Por ejemplo, la ecuación

$$We^W = -0{,}2$$

tiene como soluciones:

$$W_0(-0{,}2) = -0{,}259...$$
$$W_{-1}(-0{,}2) = -2{,}542...$$

Para univaluar la función procedemos como en el caso de la raíz cuadrada: definimos una rama principal, $W_0(x)$, que en este caso será la que satisface la condición $W(x) \geq -1$. La otra rama, denotada como $W_{-1}(x)$, corresponderá a los valores que cumplen $W(x) \leq -1$.

Polinomios exponenciales

Muchas ecuaciones en las que intervienen exponenciales o logaritmos pueden resolverse en términos de la función W de Lambert. En particular, ecuaciones de polinomios exponenciales, como el ejemplo con el que empezábamos la columna. Así, para resolver

$$x + e^x = 0\ ,$$

transformamos la ecuación para que emerja de manera natural la función W. Tras unas pequeñas manipulaciones, esta ecuación puede reescribirse como

$$-xe^{-x} = 1\ ,$$

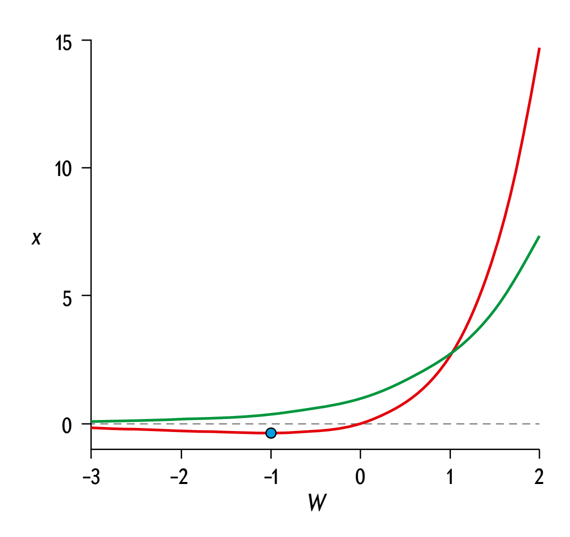
de modo que se hace evidente, por la definición implícita de W, que la solución es

$$x = -W(1) = -0{,}567...$$

Intentemos resolver otro ejemplo algo más complicado: la ecuación trascendente

$$x^2 = 2^x\ .$$

A ojo vemos que $x = 2$ y $x = 4$ son soluciones. ¿Existe alguna más?

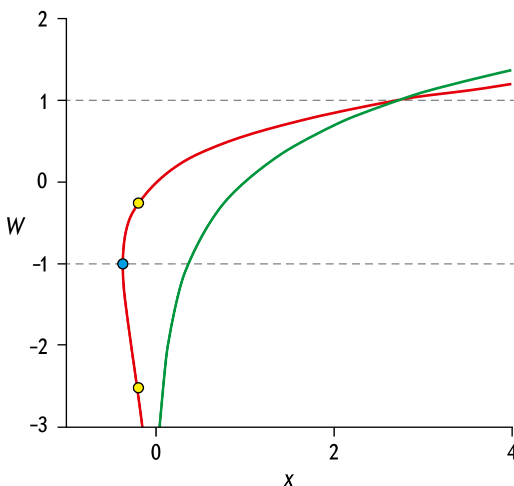


1. REPRESENTACIÓN de la función $x(W) = We^W$ (*rojo*) y de la función exponencial e^W (*verde*). A diferencia de esta última, $x(W)$ presenta un mínimo en $W = -1$, donde $x(-1) = -1/e$ (*azul*).

Tras unas sencillas manipulaciones podemos transformar nuestra ecuación en

$$-\frac{x \log 2}{2} \exp\left(-\frac{x \log 2}{2}\right) = -\frac{\log 2}{2}\ .$$

Y volvemos a estar en una situación semejante a la anterior, donde ahora en vez de $-x$ tenemos $-x\log 2/2$. Dado que en el punto $-\log 2/2$ la función W está multivaluada, obtenemos las soluciones que ya conocíamos:



2. FUNCIÓN W de Lambert (*rojo*), construida reflejando la función $x(W)$ con respecto al eje $x = W$, junto a la gráfica de la función logaritmo (*verde*) para permitir su comparación. A diferencia de esta última, $W(x)$ sí está definida para algunos valores negativos. Sin embargo, debido a la presencia del mínimo de $x(W)$ en $W = -1$ (*azul*), $W(x)$ está multivaluada en el intervalo $(-1/e, 0)$. A modo de ejemplo, los puntos amarillos señalan los dos valores de $W(-0{,}2)$.

$$x = -\frac{2}{\log 2} W_0\left(-\frac{\log 2}{2}\right) = 2$$

$$x = -\frac{2}{\log 2} W_{-1}\left(-\frac{\log 2}{2}\right) = 4$$

Sin embargo, hay una solución más. En las manipulaciones previas hemos extraído una raíz cuadrada y tomado el signo positivo. Si tomamos el negativo y operamos de forma análoga, obtenemos la siguiente solución extra:

$$x = -\frac{2}{\log 2} W\left(\frac{\log 2}{2}\right) = -0{,}766\ ...$$

En este caso se trata de una solución única, ya que W está univaluada en $x = \log 2/2$.

La forma en que hemos resuelto el problema anterior puede generalizarse sin ninguna dificultad para la ecuación

$$x^y = y^x$$

con x e y positivos, considerada en 1748 por Leonhard Euler. Procediendo exactamente igual que antes, llegamos a la solución:

$$x = -\frac{y}{\log y} W\left(-\frac{\log y}{y}\right).$$

Acabamos de ver un magnífico ejemplo de cómo la resolución de un problema particular nos permite dar con la respuesta a uno mucho más general.

Por cierto, podemos obtener un bonus. Si en la expresión anterior consideramos el caso particular $x = y$, obtenemos la siguiente propiedad de la función W:

$$W\left(-\frac{\log x}{x}\right) = -\log x\ ,$$

la cual emplearemos en lo que sigue (y que, de hecho, ya usamos de tapadillo al calcular las soluciones de $x^2 = 2^x$).

Torres infinitas de potencias

La función W aparece al estudiar torres infinitas de potencias, algo que también descubrió Euler al interesarse por estos problemas hace más de doscientos años. Considere la siguiente función:

$$h(x) = x^{x^{x^{\cdot^{\cdot^{\cdot}}}}}\ .$$

¿Cómo podemos estudiarla? ¿Para qué valores de x está definida y a qué

valores converge? ¿Podemos representarla?

El truco consiste en reescribirla como una exponencial iterada:

$$h(x) = x^{h(x)} \,,$$

que, tras unas sencillas manipulaciones, podemos convertir en

$$-\log x = -h(x)\log x \, \exp(-h(x)\log x).$$

Si ahora sustituimos x por $-\log x$ en la definición implícita de W, tenemos que

$$-\log x = W(-\log x)\, \exp(W(-\log x)) \,.$$

Comparando ambas expresiones, deducimos que

$$-h(x)\log x = W(-\log x) \,.$$

Así que ¡podemos expresar nuestra torre infinita de potencias en forma cerrada gracias a la función W! En efecto:

$$h(x) = x^{x^{x^{\cdot^{\cdot^{\cdot}}}}} = \frac{W(-\log x)}{-\log x} \,.$$

Veamos un ejemplo. Partiendo de la igualdad $2 = (\sqrt{2})^2$, podemos generar la torre infinita de potencias $h(\sqrt{2})$ reemplazando una y otra vez el exponente 2 por $(\sqrt{2})^2$:

$$2 = (\sqrt{2})^2 = (\sqrt{2})^{(\sqrt{2})^2} = \ldots = h(\sqrt{2}) \,.$$

Sin embargo, este resultado puede obtenerse directamente usando la función W:

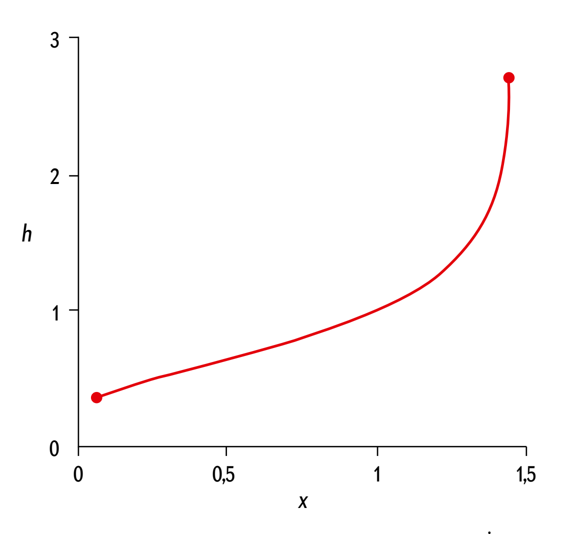
$$h(\sqrt{2}) = \frac{W(-\log \sqrt{2})}{-\log \sqrt{2}} =$$

$$= -\frac{2}{\log 2}\, W\!\left(-\frac{\log 2}{2}\right) = 2 \,.$$

donde hemos empleado la identidad con la que concluimos la sección previa. Ahora ya puede demostrar sin despeinarse que, por ejemplo:

$$h(1/4) = 1/2 \,.$$

Disponiendo de su forma cerrada, podemos dibujar la gráfica de $h(x)$. Es fácil deducir su dominio: aquellos valores de x para los que estén definidos el logaritmo y la función $W(-\log x)$. Fue así como Euler encontró que la torre infinita de potencias converge en el intervalo $[e^{-e}, e^{1/e}]$ y diverge fuera de él (*véase la figura 3*).



3. TORRE INFINITA DE POTENCIAS $h(x) = x^{x^{\cdot^{\cdot^{\cdot}}}}$, equivalente a $h(x) = -\log x\; W(-\log x)$. Los valores de W se han calculado con una rutina del lenguaje de programación Python. Como ya demostrara en su día Leonhard Euler, la función $h(x)$ converge solo en el intervalo $[e^{-e}, e^{1/e}]$.

¿Se convertirá *W* en una nueva función elemental?

Hoy, Johann Heinrich Lambert (1728-1777) es recordado principalmente por demostrar la irracionalidad de π. Pero parece que fue también el primero en estudiar la función W. Sin embargo, esta no despertó el interés de los matemáticos hasta que Euler se preocupó por ella en 1779, analizó algunas de sus propiedades y otorgó a Lambert el crédito de su descubrimiento.

Más tarde, la función W comenzó a aparecer una y otra vez en el trabajo de investigadores de campos muy dispares. El problema es que, en numerosas aplicaciones, su presencia pasa inadvertida por puro desconocimiento.

Si bien podemos encontrar ecos de la función W de Lambert que se remontan a hace 300 años, su bautizo con nombre propio tiene apenas tres décadas y, sorprendentemente, se debió a la incorporación de esta función en el conocido programa de cálculo simbólico Maple, donde se denotó como W, probablemente en honor al matemático Edward M. Wright, quien estudió la versión en variable compleja en los años cuarenta del siglo pasado.

Como un nombre lo es todo en matemáticas, y vista la ubicuidad de la función W de Lambert, en los años noventa el matemático de la Universidad de Ontario Occidental Robert M. Corless y sus colaboradores propusieron que W fuera considerada una nueva función elemental trascendente. Se denominan funciones elementales aquellas que aparecen con frecuencia en diversas aplicaciones y que han sido estudiadas y usadas desde hace cientos de años.

Las potencias, el logaritmo, la exponencial o las funciones trigonométricas y sus inversas son herramientas extremadamente útiles para resolver todo tipo de problemas, y se clasifican por ello como elementales. Pero aunque no solemos pensar en ello, se trata de una definición un tanto difusa, basada más en el uso que han tenido en matemáticas y en sus aplicaciones históricas que en cuestiones formales. Digo difusa porque algunas funciones especiales, como las de Bessel o la función error, por poner solo un par de ejemplos, no se consideran elementales.

Numerosos matemáticos opinan que una vez que se reconozca la naturaleza ubicua de la función W de Lambert no será más que cuestión de tiempo que esta pase a formar parte de las funciones elementales y que su «tecla de la fama» aparezca finalmente en las calculadoras científicas. Otros piensan que la comunidad matemática, en especial la docente, es demasiado conservadora para que esto suceda.

Ocurra lo que ocurra en un futuro, la función W de Lambert ya está presente con nombre propio en todos los programas de cálculo simbólico (aunque en Mathematica se llama ProductLog) y su presencia resultará por tanto cada vez más habitual.

Un último comentario. Al igual que la función exponencial y el logaritmo están asociados a la constante irracional e, y las funciones trigonométricas a π, también la función W de Lambert tiene asociada una constante irracional. Esta se conoce como Ω y se define como la solución de la ecuación

$$\Omega e^{\Omega} = 1,$$

la cual viene dada por

$$\Omega = W(1) = 0{,}567143290\ldots$$

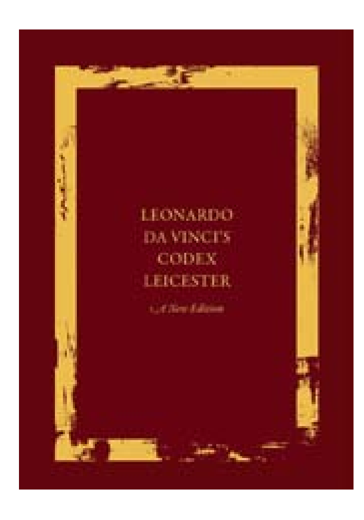
¿Encuentra el lector alguna diferencia con otras «soluciones cerradas» como podrían ser $\exp(1) = e$ o $\arccos(-1) = \pi$? IyC

PARA SABER MÁS

On the Lambert *W* function. Robert M. Corless et al. en *Advances in Computational Mathematics*, vol. 5, págs. 329-359, diciembre de 1996.

A new elementary function for our curricula? Sean Stewart en *Australian Senior Mathematics Journal*, vol. 19, págs. 8-26, enero de 2005.

Why *W*? Brian Hayes en *American Scientist*, marzo-abril de 2005.



LEONARDO DA VINCI'S CODEX LEICESTER
A NEW EDITION
Leonardo da Vinci
Edición de Domenico Laurenza y Martin Kemp
Oxford University Press, 2019

Leonardo en el laboratorio

Una nueva mirada a los modelos experimentales del genio renacentista para estudiar el movimiento del agua y de la sangre

Leonardo da Vinci, de cuya muerte se cumplen ahora 500 años, fue un adelantado a su tiempo: ya conocemos el cliché. Sin embargo, puede decirse que en lo esencial fue en gran medida un hombre de su época. Los grandes artistas e ingenieros del Renacimiento italiano constituyeron el preludio de su versatilidad. En particular, Filippo Brunelleschi, inventor y arquitecto de la enorme cúpula de la catedral de Florencia, formuló la ciencia de la perspectiva lineal para los pintores en los primeros años del siglo XV [*véase* «El pensamiento matemático de Leonardo da Vinci», por Pedro J. Miana, *en este mismo número*]. En su trabajo relacionado con las ciencias físicas, Leonardo fue heredero de las teorías medievales de la estática y la dinámica, pues aún faltaba mucho para Isaac Newton. Y sus investigaciones anatómicas combinaron la fisiología medieval con los análisis funcionales y morfológicos de Galeno.

Así pues, tal vez sea mejor decir que lo que demuestran las innovaciones de Leonardo es que consiguió llegar mucho más lejos que sus predecesores o contemporáneos en el contexto científico de su época. La más notoria de tales innovaciones fue el perfeccionamiento o invención de casi todas las técnicas de ilustración conocidas con anterioridad al advenimiento de la radiografía. En sus cuadernos dibujó objetos usando la perspectiva. Mostró formas sólidas modeladas de manera sistemática con luces y sombras. Las seccionó para exponer sus estructuras internas. Empleó transparencias para enseñar las características subyacentes. Representó «vistas explosionadas» de partes del cuerpo y de máquinas para revelar sus formas y articulaciones. Inventó representaciones esquemáticas para poner de manifiesto las funciones de sistemas corporales y mecánicos. Y dibujó experimentos mentales para explorar cómo funcionaban las cosas. Leonardo empleó con frecuencia estas técnicas en sus esfuerzos científicos e ingenieriles.

Entre el amplio abanico de fenómenos que estudió y representó se encuentra el comportamiento de los líquidos. *Leonardo da Vinci's Codex Leicester* es una nueva edición en cuatro volúmenes del cuaderno científico de 72 páginas escrito después de 1508, donde el historiador de la ciencia Domenico Laurenza y quien escribe estas líneas mostramos cómo funcionaban sus revolucionarias ideas sobre la dinámica de fluidos en el contexto específico de la antigua historia del «cuerpo del mundo».

Las páginas exteriores del *Códice Leicester* se ocupan, en parte, de las teorías de Leonardo sobre el paso de la luz del Sol a la Tierra y a la Luna, lo que implicaba reflexiones en mares reales o supuestos. Sin embargo, la mayoría del cuaderno se dedica al estudio del agua en movimiento: en los mares, ríos y canales concebidos como *vene d'aqua* («venas de agua») tanto en la superficie de la Tierra como debajo de ella. El principio que subyace tras el pensamiento de Leonardo es el del micro- y el macrocosmos: vio el cuerpo humano como un «mundo menor» que reflejaba las formas y funciones del mundo exterior.

Mientras que las personalidades anteriores, como el astrónomo y geógrafo romano del siglo II Ptolomeo, habían contemplado la Tierra a partir de cambios relativamente locales, Leonardo consideró su dilatada historia de grandes transformaciones. En sus teorías geológicas, algunas partes de la corteza terrestre se desmoronaban, lo que transformaba violentamente la relación entre la tierra y el agua. A medida que cambiaban los centros de gravedad, algunas porciones de la corteza emergían para formar paisajes y montañas.

Entre los aspectos más originales de la investigación de Leonardo se encuentran lo que legítimamente podríamos llamar «experimentos de laboratorio», los cuales hacen uso de ingeniosos modelos físicos. Los extensos análisis del italiano sobre el comportamiento del agua combinan las teorías matemáticas del movimiento con una observación aguda. Los ensayos documentados en el códice se diseñaron para demostrar cómo se generaban las olas con el viento y cómo las corrientes y los vórtices trazaban sus complejos arabescos bajo la superficie. En dos pequeños dibujos situados en los márgenes del folio 9v bosquejó un tanque experimental. La ilustración superior lleva la etiqueta *experientia* («experiencia» o «experimento»). Una nota que lo acompaña le recuerda a Leonardo «conseguir un recipiente de terracota, con un fondo grande y plano, de dos brazos [116 centímetros] de largo y medio brazo [29 centímetros] de ancho; que lo haga aquí el ceramista». Los lados del tanque, escribió, deberían ser de vidrio. Después introduciría en el agua semillas de hierba (*Panicum* spp.) que podría usar para estudiar los vórtices en acción.

Una de las metas que se propuso fue observar lo que le sucede a un objeto móvil en el fondo del tanque cuando sopla una corriente de aire a través de una abertura rectangular situada en un extremo, justo sobre la superficie del agua. Leonardo concluyó que el objeto se movería en dirección opuesta al viento. Tales configuraciones experimentales revelan que los magníficos estudios sobre la turbulencia que realizó Leonardo, conservados en la Biblioteca Real del castillo de Windsor, en el Reino Unido, no provienen de la observación de la naturaleza, sino de los experimentos sobre el movimiento de los vórtices. Concentrándose uno a uno en varios aspectos del movimiento combinado del agua y el aire sumergido, el italiano completó una gran síntesis.

En el folio 15r Leonardo señala que, en el punto donde se unen dos ríos, «lo que sucede con los lechos [...] puede entenderse mediante un sencillo experimento con arena». Esta modelización de la interacción del agua con su lecho arenoso alcanza un mayor nivel de complejidad en el *Códice atlántico*, una serie de cua-

dernos que se conservan en la Biblioteca Ambrosiana de Milán. En el folio 227v de esta obra, Leonardo se propone fabricar un modelo experimental a escala de los golfos y mares del Mediterráneo, con sus principales ríos, para poner a prueba su reconstrucción de los antiguos procesos geológicos. Especuló que el estrecho de Gibraltar se agrandaría con el tiempo, permitiendo que el Mediterráneo se convirtiera en un poderoso río, una extensión del Nilo.

Sus estudios sobre el movimiento de la sangre en el cuerpo humano incluían modelos experimentales similares. Leonardo estaba especialmente interesado en la válvula aórtica del corazón, con tres valvas, y de la cual comprendió que era pasiva y debía ser accionada por el movimiento de la sangre. Para demostrar su teoría de que los vórtices se curvan hacia atrás en la constricción con forma de matraz que se halla presente en el cuello de la aorta, para así llenar las valvas, propuso construir un molde de cerámica con la forma del cuello y en el que podría soplar un conducto de vidrio con forma de vaso sanguíneo. De ese modo sería capaz de presenciar —de nuevo, gracias a las semillas de hierba— el movimiento del agua y la acción de las valvas, lo que constituiría una «demostración» de cómo se comporta la sangre.

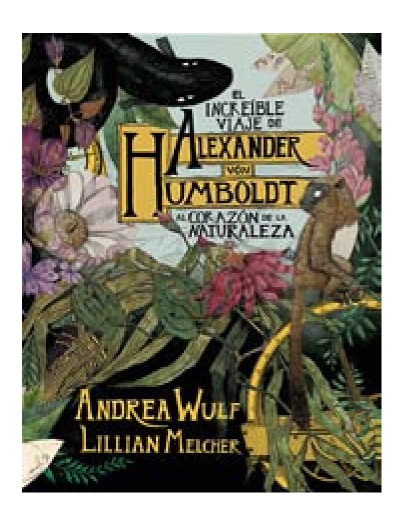
El especialista en dinámica de fluidos Morteza Gharib, del Instituto de Tecnología de California, ha reconstruido el modelo de Leonardo y empleado modernas técnicas de imagen para demostrar la existencia de los vórtices giratorios que el italiano interpretó que cerraban la válvula. Sin duda, algo así constituye un modelo extremadamente original para el Renacimiento temprano. Así pues, y aunque Leonardo viviera en su propia época, sí cabe afirmar que hizo alguna que otra incursión en el futuro.

A menudo se afirma que, como la ciencia de Leonardo no se publicó ni distribuyó durante siglos, tampoco ejerció ningún impacto en los desarrollos científicos ulteriores. En esta edición del *Códice Leicester* Laurenza explica que, en realidad, su obra era conocida en los círculos de científicos que reformaron la geología entre los siglos XVII y XIX, como el vulcanólogo William Hamilton, embajador británico en Nápoles desde 1764 hasta 1800. Algunas copias del códice escritas a mano alcanzaron una gran circulación por lugares clave para la geología moderna, como Londres, Roma, Florencia, Nápoles, París y Weimar. De una manera u otra, Leonardo nunca deja de sorprender a quienes lo estudian.

—Martin Kemp
Universidad de Oxford

Artículo original publicado en *Nature*, vol. 571, págs. 322-323, 2019. Traducido con el permiso de Macmillan Publishers Ltd. © 2019

Con la colaboración de nature



EL INCREÍBLE VIAJE DE ALEXANDER VON HUMBOLDT AL CORAZÓN DE LA NATURALEZA
Andrea Wulf y Lilian Melcher
Random Comics, 2019

Alexander von Humboldt en novela gráfica

Un tratamiento ilustrado de las hazañas del gran naturalista prusiano en Sudamérica

Hace cuatro años, la historiadora Andrea Wulf rescató a Alexander von Humboldt (1769-1859) de la relativa oscuridad internacional en la que vivía con la biografía *La invención de la naturaleza* [*véase* «Humboldt: ahora es verde», por Oliver Hochadel; Investigación y Ciencia, diciembre de 2016]. Para celebrar el 250 aniversario del nacimiento del naturalista, este año Wulf se ha unido a Lillian Melcher para crear *El increíble viaje de Alexander von Humboldt al corazón de la naturaleza*, una novela gráfica que representa los cinco años de exploración de un joven Humboldt en América Latina.

En aquella época los científicos se habían obsesionado con medir y documentar todos los aspectos del entorno, desde los rasgos humanos hasta la elevación de las colinas. Sin embargo, nadie había llevado esa investigación tan lejos como Humboldt y nadie había pensado tan seriamente como él en la manera en que tales mediciones podrían integrarse en una comprensión holística del planeta.

La historia de la aventura y el descubrimiento se adapta bien al formato gráfico, y Wulf y Melcher lo demuestran con orgullo. Un texto informativo y alegre, junto a unas ilustraciones ingeniosas, dan vida al bullicioso carácter de Humboldt mientras arrastra a su pequeño grupo de compañeros más allá de sus zonas de confort: hacia volcanes en llamas, pozos mineros, ríos llenos de cocodrilos o bosques lluviosos repletos de mosquitos.

Los viajeros portan consigo los instrumentos científicos punteros de su tiempo —a menudo decididamente frágiles— para medir tantos parámetros físicos como les sea posible (el precioso barómetro de Humboldt, con su modesto suministro de tubos de vidrio de repuesto, hace frecuentes apariciones en la obra). También llevan multitud de cuadernos: Humboldt registró meticulosamente cada medición realizada y cada especie de flora o fauna encontrada. Melcher a menudo ordena sus ilustraciones en composiciones de tipo *collage* con páginas de aquellos cuadernos.

Leer sobre los extraordinarios logros de Humboldt lleva a preguntarse cómo llegó a estar tan olvidado fuera de Alemania. Su voraz apetito por el conocimiento no permitía que nada, ni siquiera el peligro personal, se interpusiera en la recopilación de datos sobre el mundo natural. Su capacidad para sintetizar el conocimiento era igualmente vasta, lo que le permitió construir su gran teoría de que todo en la naturaleza se halla conectado. Alterar cualquier elemento de esa red gigante, ya sea una especie o un clima local, tendrá efectos en cadena, argumentó. Advirtió con prontitud de que la deforestación po-

dría dañar el clima y el entorno, pues los bosques humedecen y refrescan la atmósfera al tiempo que evitan la erosión del suelo. [*Véase* «Von Humboldt: el científico universal», por J. M. Sánchez Ron; *en este mismo número*.]

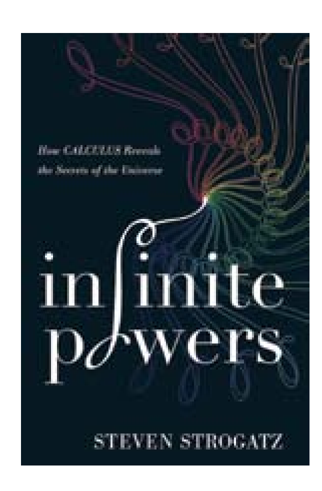
Humboldt fue amigo de otros gigantes intelectuales de su tiempo, como Johann Wolfgang von Goethe. Y Charles Darwin reconoció su deuda intelectual para con él. Todo tipo de fenómenos llevan su nombre, desde la corriente de Humboldt, en la costa occidental de Sudamérica, hasta el majestuoso pico de Humboldt, en las montañas Rocosas de Colorado. También han sido bautizadas en su honor numerosas especies de plantas y animales, y muchas ciudades alemanas tienen una Humboldtstraße.

Humboldt fue un progresista que se expresó con fuerza contra la esclavitud, un científico motivado y muy centrado, y un hombre de casi infinita confianza en sí mismo. *El increíble viaje de Alexander von Humboldt* ofrece una espléndida vía para empezar a conocerlo.

—Alison Abbot

Artículo original publicado en *Nature*, vol. 568, págs. 168-169, 2019. Traducido con el permiso de Macmillan Publishers Ltd. © 2019

Con la colaboración de nature



INFINITE POWERS
HOW CALCULUS REVEALS THE SECRETS OF THE UNIVERSE

Steven Strogatz
Houghton Mifflin Harcourt, 2019

Cálculo para todos los públicos

Un repaso a la historia, ideas y aplicaciones de una de las herramientas matemáticas que han construido nuestro mundo

Steven Strogatz es profesor de matemática aplicada en la Universidad Cornell desde 1994. Antes pasó por Princeton, Cambridge, Harvard y el Instituto de Tecnología de Massachusetts. Probablemente su contribución más conocida sea un trabajo publicado en *Nature* en 1998 junto con Duncan Watts, por aquel entonces estudiante suyo, sobre las llamadas «redes de mundo pequeño». Aquel estudio marcaría el nacimiento de la teoría moderna de redes complejas y acabaría por convertirse en el sexto artículo de física más citado de todos los tiempos [*véase* «La ciencia de redes cumple 20 años», por Alessandro Vespignani; Investigación y Ciencia, diciembre de 2018].

Strogatz es experto en dinámica no lineal y sistemas complejos, y suele inspirarse para investigar en «curiosidades de la vida cotidiana»: temas cercanos que, iluminados por la matemática, se tornan sorprendentes. Además de un referente en su área de investigación, es un gran maestro y comunicador. *Infinite powers*, un superventas según el *New York Times*, es su libro más reciente. Previamente había escrito *Nonlinear dynamics and chaos* (1994), *Sync* (2003), *The calculus of friendship* (2009) y *The joy of x* (2012).

En las primeras páginas de *Infinite powers* Strogatz nos deja clara su intención: hacer accesible la historia y las grandes ideas del cálculo al público general, convenciéndonos del papel clave que ha desempeñado el análisis matemático en la construcción de nuestro mundo. El tema del libro es «cómo cambian las cosas». Y, para Strogatz, las matemáticas no solo nos permiten describir esos cambios, no solo son el lenguaje de la ciencia, sino que constituyen una forma de razonar que concluye en predicciones que se ajustan asombrosamente bien a la realidad.

Si usted se dedica a la enseñanza de las matemáticas, como es mi caso, seguro que le han preguntado una infinidad de veces para qué sirve esta disciplina. El libro de Strogatz comienza con un par de ejemplos que responden con ingenio a esta pregunta: inventos como el láser o las comunicaciones inalámbricas que disfrutamos —o padecemos— hoy en día nunca hubieran sido posibles sin el cálculo. Al formalizar los descubrimientos empíricos de Michael Faraday y André-Marie Ampère sobre la electricidad y el magnetismo, James Clerk Maxwell predijo matemáticamente las ondas electromagnéticas. Poco después, Heinrich Hertz demostró experimentalmente su existencia, lo que más tarde concluyó en el primer sistema de radiocomunicación por parte de Nikola Tesla. La historia del láser es similar. Predicho teóricamente por Albert Einstein, inunda hoy nuestra tecnología.

Cada capítulo del libro nos muestra algún ejemplo semejante del papel que la matemática ha ejercido en el desarrollo del GPS, de los mallados triangulares para la animación digital, en el estudio del empaquetamiento del ADN o en el uso de «ondículas» (*wavelets*) para clasificar huellas digitales, por nombrar solo algunos ejemplos. Por desgracia, puesto que la obra está dedicada a un público sin conocimientos matemáticos, el libro no acaba de entrar en detalles en ningún caso. Ello puede suponer un *coitus interruptus* para el lector más avezado, aunque también puede resultar un acicate para que quien lo desee explore por su cuenta a mayores profundidades.

Según Strogatz, la impresionante eficacia del cálculo puede resumirse en la siguiente estrategia: «Para resolver un problema difícil sobre cualquier cosa continua, rebánela en infinitas partes y resuelva cada una de ellas. Entonces podrá obtener la respuesta al problema original juntando todas esas respuestas parciales. He llamado a este credo el Principio Infinito». Como consecuencia, el autor nos presenta el cálculo en dos partes bien diferenciadas: el cálculo diferencial, que trocea nuestro problema, y el cálculo integral, que finalmente suma las partes.

La obra sigue un recorrido histórico donde prima la aplicación de la matemática a su versión más pura. Por eso el primer personaje estrella es Arquímedes, en vez de Pitágoras. Comienza con el concepto capital de infinito, mostrando cómo la famosa paradoja de Zenón sobre Aquiles y la tortuga no resulta paradójica vista desde el análisis. Y presenta las ideas de Arquímedes, adelantadas 2000 años a su

tiempo («¿Ha existido alguna vez alguien más adelantado a su tiempo?»), sobre el cálculo del valor de pi usando polígonos y su prodigioso método de exhaución.

Con un salto de 1800 años pasa a Galileo, el racional heredero de Arquímedes que estableció las primeras leyes de la cinemática en la Tierra, y a Kepler, el místico heredero de Pitágoras que hizo lo propio con sus tres famosas leyes para los cielos. Luego nos relata el nacimiento de la geometría analítica y el encuentro entre la geometría y el álgebra a través de la poco conocida rivalidad entre Descartes, «un ego tan grande como su genio», y Fermat, que crea el embrión del cálculo diferencial al enfrentarse a problemas de optimización y acaba enunciando el principio de mínima acción.

Antes de relatar el famoso enfrentamiento entre Newton y Leibniz por la paternidad del cálculo diferencial, Strogatz explicita los tres problemas centrales del cálculo: encontrar la tangente a una curva en un punto; dadas las tangentes de una curva, encontrar la curva en sí; y hallar el área bajo una curva. Para abordarlos comienza por desentrañar «el enigma de la velocidad instantánea», tomando como ilustración la famosa carrera de los cien metros de Usain Bolt en los Juegos Olímpicos de Pekín en 2008, y sigue en esta línea hasta explicar «visualmente» el teorema fundamental del cálculo a través de sencillos ejemplos de cinemática.

En el siglo XVIII se produce una «explosión cámbrica» en el cálculo que empieza a percolar en todas las áreas de la matemática

Al igual que queda patente su predilección por Fermat frente a Descartes, ocurre lo mismo con Leibniz frente a Newton. Mientras que del primero afirma que fue «el genio más versátil en una centuria de genios que incluyen a Descartes, Galileo, Newton y Bach», de Newton apostilla: «Nunca se casó, y hasta donde sabemos nunca tuvo una relación romántica. Rara vez reía». Especialmente interesante resulta la discusión sobre el peliagudo concepto de infinitesimal («es más pequeño que cualquier cosa pero más grande que nada») y el tratamiento distendido que hace de los diferenciales, los desarrollos de potencias o las sumas telescópicas y su relación con las integrales.

Después de explicarnos cómo Newton construyó su sistema del mundo a partir de sus tres famosas leyes y de la ley de la gravitación universal (y cómo esas mismas herramientas nos permiten mejorar... ¡el diseño de arados!), nos encontramos el que, para mí, constituye el mejor ejemplo de los que aparecen en el libro: un modelo con ecuaciones diferenciales para el virus del sida debido a los matemáticos David Ho y Alan Perelson, el cual culminó con la estrategia de la terapia triple que se emplea hoy en día.

A partir del siglo XVIII se produce una «explosión cámbrica» en el cálculo que empieza a percolar en todas las áreas de la matemática. Strogatz nos introduce en las ecuaciones diferenciales ordinarias y en derivadas parciales a través de los trabajos de Fourier sobre la ecuación del calor y de los famosos patrones de Chladni que estudió Sophie Germain. Una vez más aparecen ejemplos de aplicaciones como los hornos de microondas o la tomografía computarizada, para la que el aparataje matemático, debido a Johann Radon, estaba listo cuarenta años antes. Y, por supuesto, no podían faltar la inteligencia artificial y el aprendizaje automático. La obra cierra con tres ejemplos más: la sorprendente capacidad de predicción de la electrodinámica cuántica, el descubrimiento de la antimateria y la teoría general de la relatividad.

Si usted es un lector poco ducho en matemáticas y siente curiosidad por saber qué papel ha jugado el cálculo en la historia del pensamiento, este es sin duda su libro. Pero si las matemáticas están presentes en su vida como profesional de la educación o de la investigación, no creo que la obra vaya a contarle muchas cosas que no haya leído antes. Le decepcionará —aunque sea fan de Strogatz, como es mi caso— sencillamente porque el nivel le resultará muy superficial. Pero como sé que si usted es admirador de Strogatz lo leerá sí o sí, me gustaría añadir que el entusiasmo que desprende un autor ya consagrado como él resulta contagioso. Y esa energía es aire fresco para cualquiera.

—Bartolo Luque
Universidad Politécnica de Madrid

Recopilación de Daniel C. Schlenoff

DICIEMBRE

1969 Actitudes ante la hierba

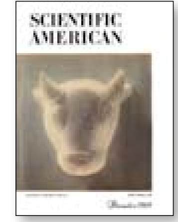
«La actitud predominante de la población estadounidense ante la marihuana está cargada de una hiperemotividad tendenciosa. Esta se debe en parte a una campaña educativa iniciada en los años treinta por el Departamento Federal de Narcóticos, la cual difundió no pocas tergiversaciones y mucha desinformación sobre esa droga. La huella de la ética protestante, aún poderosa en este país, condena la marihuana como opiáceo usado solo como fuente de placer (mientras que acepta el alcohol porque lubrica los engranajes del comercio y cataliza las relaciones sociales). El efecto de la marihuana de producir introspección y apatía física repugna a una tradición cultural que valora la actividad, la agresividad y el éxito.»

Felicitación de Año Nuevo

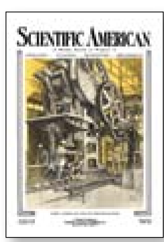
«Los versos que siguen se escribieron después de que el poeta W. H. Auden leyera *Vida en la piel humana*, de Mary J. Marples [*Scientific American*, enero de 1969]:

Manda la tradición en este día
que cada cual examine bien
su vida,
mis deseos de felicidad a todos,
hongos, bacterias, virus,
aerobios y anaerobios:
un venturoso Año Nuevo
a todos para quienes mi
ectodermo es como para mí una
Tierra Media.

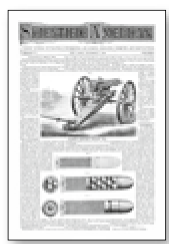
Quisiera creer que
un mundo difícil no ofrezco,
aunque no será un paraíso:
cuanto hago, sea por juego o
con un fin,
allá puede que resulte
desastroso.
Y si eres creyente,
¿cómo justificarían tus obras
los sufrimientos inmerecidos?»



1969



1919


1869

1919 La naturaleza de las cosas

«Nos expone el doctor Einstein que, cuando se alcanzan unas velocidades que solo ahora hemos podido investigar de cerca, suceden cosas extraordinarias, irreconciliables con nuestras ideas actuales del tiempo y el espacio y de la masa y la distancia. Nos tienta reírnos de él, decirle que los fenómenos que sugiere son absurdos porque contradicen esos conceptos. Nada sería más imprudente. Debemos prepararnos para admitir que esas condiciones revelan unos hechos que marcan una época, tanto como cuando Galileo apuntó al firmamento el primer telescopio. Y si esos hechos nos obligan a descartar las ideas presentes sobre el tiempo y el espacio y sobre la masa y la distancia, debemos hacerlo tan concienzudamente como nuestros antepasados medievales tuvieron que renunciar a sus ideas de la perfección celestial.»

1869 No apta para el vuelo

«En una sala de los Talleres Avitor, en Shell Mound Lake (California), tuvo lugar la exhibición de una máquina voladora, designada como “Avitor” por su inventor, el señor Frederic Mariott. De ella incluimos una ilustración. Las esperanzas que en principio suscitó el éxito del experimento, realizado en un espacio cerrado, se vieron luego frustradas por los fracasos de los intentos de gobernarla contra el viento. Era solo una máquina de prueba, un globo en forma de cigarro, de once metros de longitud. La caldera y el fogón miden juntos solo poco más de treinta centímetros de largo y diez de ancho.»

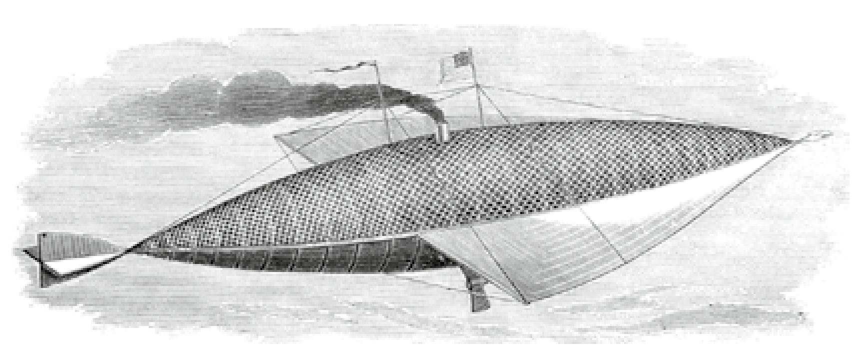
La invención de la tarjeta postal

«El Gobierno austríaco ha introducido una novedosa forma de franqueo, de cuyas ventajas podrían beneficiarse otros países. Su propósito es que cualquier persona pueda enviar mensajes breves sin las molestias de papeles, plumas y sobres. En todas las oficinas de correos se venden por dos cruceros unas tarjetas de tamaño fijo, en una de cuyas caras se escribe el destinatario y en la otra el texto. Sin sobres se echan en el buzón y se reparten. Un correo sencillo y económico como este sería realmente muy cómodo, sobre todo en las grandes ciudades.»

Pensamientos de locura

«Nuestros cerebros son relojes de setenta años. El Ángel de la Vida les da cuerda, luego cierra la caja, y pone la llave en la mano del Ángel de la Resurrección. ¡Tic-tac, tic-tac!, se mueven los engranajes del pensamiento; nuestra voluntad no puede pararlos; no pueden pararse por sí mismos; el sueño no puede lentificarlos; solo la locura puede acelerarlos; únicamente la muerte puede irrumpir en la caja e, inmovilizando el péndulo siempre oscilante, al que llamamos corazón, silenciar al fin los clics de la terrible rueda de escape que tanto tiempo hemos llevado bajo nuestras arrugadas frentes. ¡Ojalá pudiéramos llegar hasta ellos mientras reposamos sobre nuestra almohada y contar los adormecidos compases de un pensamiento tras otro y de una imagen tras otra rechinando por nuestros agotados órganos!
—Oliver Wendell Holmes»

SCIENTIFIC AMERICAN, VOL. XXI, N.º 23, 4 DE DICIEMBRE DE 1869


1869: El «Avitor» voló bien como modelo, pero fracasó en condiciones reales.



FÍSICA

Cristales temporales

Frank Wilczek

Un sorprendente nuevo estado de la materia manifiesta en el tiempo la misma simetría que los cristales ordinarios presentan en el espacio.



ECONOMÍA

El ineludible casino

Bruce Boghosian

Una nueva aproximación desarrollada por físicos y matemáticos describe la distribución de la riqueza con una precisión sin precedentes.

BIOLOGÍA

La epigenética, moduladora clave de la evolución

Edith Heard y Vincent Colot

La epigenética mantiene bajo control un poderoso reservorio de variaciones que podrían tener un efecto importante dentro de la propia especie.



MICROBIOLOGÍA

Buscando vida en el Atacama

Armando Azúa-Bustos y Carlos González-Silva

La exploración del desierto realizada a lo largo de los últimos quince años ha llevado al descubrimiento de vida microbiana en lugares insospechados.

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA
DIRECTORA EDITORIAL
Laia Torres Casas
EDICIONES Anna Ferran Cabeza, Ernesto Lozano Tellechea, Yvonne Buchholz
DIRECTOR DE MÁRQUETIN Y VENTAS
Antoni Jiménez Arnay
DESARROLLO DIGITAL
Bruna Espar Gasset
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón, Albert Marín Garau
SECRETARÍA Eva Rodríguez Veiga
ADMINISTRACIÓN Victoria Andrés Laiglesia
SUSCRIPCIONES Concepción Orenes Delgado, Olga Blanco Romero

EDITA
Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344
precisa@investigacionyciencia.es
www.investigacionyciencia.es

SCIENTIFIC AMERICAN
ACTING EDITOR IN CHIEF Curtis Brainard
PRESIDENT Dean Sanderson
EXECUTIVE VICE PRESIDENT Michael Florek

DISTRIBUCIÓN
para España:
LOGISTA, S. A.
Pol. Ind. Polvoranca - Trigo, 39 - Edificio B
28914 Leganés (Madrid)
Tel. 916 657 158
para los restantes países:
Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona

PUBLICIDAD
Prensa Científica, S. A.
Teléfono 934 143 344
publicidad@investigacionyciencia.es

ATENCIÓN AL CLIENTE
Teléfono 935 952 368
contacto@investigacionyciencia.es

Precios de suscripción:

	España	Extranjero
Un año	75,00 €	110,00 €
Dos años	140,00 €	210,00 €

Ejemplares sueltos: 6,90 euros
El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.



COLABORADORES DE ESTE NÚMERO
Asesoramiento y traducción:
Javier Grande: *Apuntes, ¿Qué ocurriría si se fundieran todos los icebergs? y Leonardo en el laboratorio*; Andrés Martínez: *Apuntes*; Mercè Piqueras: *Siguiendo la pista a humanos y microbios*; Pedro Pacheco González: *Monstruos de los cielos mesozoicos y Lucha animal*; Lorenzo Gallego: *¿Es reversible la muerte?*; Miguel A. Vázquez Mozo: *El material soñado*; Juan Pedro Adrados: *El impacto de un meteorito*; Xavier Roqué: *Los inicios del radar en España*; José Óscar Hernández Sendín: *¿Es seguro el voto telemático? y El universo en rayos X*; Bartolo Luque: *El problema de la significación estadística*; Ignacio Navascués: *Las raíces de la agresividad humana*; J. Vilardell: *Hace...*

ISSN edición impresa 0210-136X Dep. legal: B-38.999-76
ISSN edición electrónica 2385-5665

Imprime Rotimpres - Pla de l'Estany s/n - Pol. Ind. Casa Nova 17181 Aiguaviva (Girona)

Printed in Spain - Impreso en España